

Lais de Bortoli Klein

**CONTROLE QUALITATIVO E QUANTITATIVO DO  
ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES TIPOS DE  
COBERTURAS**

Dissertação submetida ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de mestre em  
Engenharia Civil.

Orientador: Enedir Ghisi, PhD.

Florianópolis  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Klein, Lais de Bortoli

Controle qualitativo e quantitativo do  
escoamento pluvial em diferentes tipos de cobertura  
/ Lais de Bortoli Klein ; orientador, Enedir Ghisi,  
2017.

181 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Coberturas verdes. 3.  
Aproveitamento de água pluvial. 4. Qualidade da  
água. 5. Escoamento pluvial. I. Ghisi, Enedir. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Lais de Bortoli Klein

**CONTROLE QUALITATIVO E QUANTITATIVO DO  
ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES TIPOS DE  
COBERTURAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de  
“Mestre em Engenharia Civil”, e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 27 de março de 2017.

---

Glicério Trichês  
Coordenador do PPGEC

**Banca examinadora:**

---

Prof. Enedir Ghisi, PhD.  
Orientador – UFSC

---

Prof. Roberto Lamberts, PhD. – UFSC

---

Prof<sup>a</sup>. Celimar Azambuja Teixeira, Dr<sup>a</sup>. – UTFPR

---

Prof<sup>a</sup>. Rutinéia Tassi, Dr<sup>a</sup>. – UFSM  
(Videoconferência)



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela benção da vida e por me dar força ao longo da minha trajetória.

Aos meus pais, Hélio e Isabel, e meu irmão, Heitor, pelo apoio incondicional, amor e carinho. Vocês são a melhor família que eu poderia ter.

Ao Professor Enedir Ghisi, por aceitar me orientar neste estudo e pelo empenho e seriedade em que conduziu a orientação.

Às Professoras Rutinéia Tassi e Celimar Azambuja Teixeira e ao Professor Roberto Lamberts, por aceitarem participar da avaliação deste trabalho.

À empresa Ecotelhado, por ter disponibilizado os sistemas de coberturas verdes modulares e ao João Manuel Feijó, pelo incentivo a utilizar estas coberturas neste trabalho.

À empresa Teto vivo, por ter me concedido o substrato utilizado na montagem das coberturas verdes.

Ao Professor Saulo Güths, por permitir que eu realizasse o estudo na cobertura do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN).

Ao Professor Maurício Luis Sens, por permitir a realização de alguns testes de qualidade da água no Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOA).

Ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), por disponibilizar o equipamento e os reagentes necessários para determinação de alguns parâmetros de qualidade da água.

Ao pessoal do LEPTEN, do LAPOA e do LabEEE, que me ajudaram na montagem dos protótipos e na realização dos testes de qualidade da água.

Ao meu amigo Mateus Bavaresco, pela parceria em todas as matérias e por ter me ajudado grandemente na montagem das coberturas verdes. Sua ajuda foi fundamental.

Ao meu namorado Renan, por sempre me apoiar, me animar e me incentivar a nunca desistir, por mais difícil que as coisas pareçam ser.

Às minhas tias Rejane, Sandra, Joice e Neusa e à minha prima Lidiane, obrigada por sempre acreditarem no meu melhor.

Às minhas avós, Dulce e Maria Joaquina, obrigada por todo amor e por serem exemplos de vida para mim.

Às minhas amigas Carol, Thaís, Camila, Ana Clara, Ana Beatriz, Amanda, Daiane, Thaís Suemi e Paula, por estarem sempre comigo, perto ou longe. Vocês estão no meu coração.

Aos amigos que o mestrado me deu, obrigada por toda parceria, tanto em sala de aula quanto nos encontros realizados. Vocês fizeram toda diferença.

À minha amiga Kácia, por ser minha parceira do início ao fim e compartilhar comigo todas as dificuldades encontradas.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e à CAPES, pela bolsa de estudos concedida para realização do Mestrado.

À Priscila, da Secretaria do PPGEC, por ser sempre tão prestativa e simpática com os alunos da pós-graduação.

E por todos que torceram por mim durante este período.

## RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi analisar o comportamento de diferentes coberturas verdes e de uma cobertura convencional quanto ao controle quantitativo e qualitativo do escoamento pluvial em Florianópolis-SC. Foram construídos quatro protótipos em micro-escala, que simularam uma cobertura convencional com telhas de fibrocimento e três tipos de coberturas verdes, sendo duas modulares (modular alta e modular baixa) e uma contínua. Foram monitorados 35 eventos de precipitação entre junho de 2016 e janeiro de 2017. A análise do controle quantitativo foi realizada por meio da determinação do coeficiente de escoamento superficial e do potencial de retenção por unidade de área de cada cobertura. Para análise do controle qualitativo foram coletadas amostras do escoamento de cada cobertura e também da água da chuva coletada diretamente da atmosfera. Os parâmetros avaliados foram: pH, turbidez, cor aparente, oxigênio dissolvido, ferro, nitrito, nitrato, amônia, fósforo, fosfato, coliformes totais e coliformes termotolerantes. A comparação dos resultados foi realizada utilizando-se os métodos estatísticos *t-test*, Mann-Whitney e Kruskal-Wallis. Complementarmente, por meio de simulação computacional utilizando o programa Netuno, verificou-se o potencial de economia de água potável que pode ser alcançado com um sistema de aproveitamento de água da chuva instalado em edificações residenciais unifamiliares que possuam cobertura verde ou cobertura de fibrocimento. Os resultados obtidos com a pesquisa demonstraram o elevado potencial de retenção do escoamento pluvial das coberturas verdes. Os valores de coeficiente de escoamento superficial médio foram iguais a 0,16 para cobertura verde modular alta, 0,24 para cobertura verde modular baixa e 0,35 para cobertura verde contínua. Em contraste, o valor observado para cobertura convencional foi igual a 0,92. Verificou-se que o potencial de retenção do escoamento pluvial das coberturas verdes é influenciado pelo tipo de sistema utilizado, pela condição de umidade antecedente e pela altura pluviométrica da precipitação. Quanto à qualidade do escoamento, verificou-se que dentre os parâmetros indicados na NBR 15.527, que define padrões de qualidade para usos restritivos não potáveis, apenas o valor de pH obtido para a cobertura verde modular alta atendeu ao especificado pela norma. Além disso, as coberturas verdes se comportaram como fonte de ferro, nitrato, fósforo e fosfato, principalmente a contínua, que utilizou maior quantidade de substrato. Durante o monitoramento, percebeu-se que a dinâmica de alguns parâmetros na água escoada foi influenciada pela sazonalidade, idade e tipo da cobertura, realização de manutenção e

volume da precipitação. Por fim, considerando-se um sistema de aproveitamento de água da chuva, as simulações indicaram que o potencial de economia que pode ser alcançado em edificações residenciais unifamiliares que possuam coberturas verdes é fortemente dependente da área de captação e da demanda de água. Os potenciais de economia obtidos para as coberturas verdes variaram de 8,66 a 44,99%. Para a cobertura convencional, a faixa de valores ficou entre 25,72 e 46,21%. Deste modo, a presente pesquisa mostra a importância de se analisar as coberturas verdes em diferentes locais e com distintas configurações, visto que o comportamento no controle quali-quantitativo do escoamento pluvial deste tipo de cobertura é influenciado tanto por suas características intrínsecas quanto extrínsecas.

**Palavras chave:** Coberturas verdes, controle quantitativo do escoamento pluvial, economia de água potável, aproveitamento de água da chuva, qualidade do escoament



## ABSTRACT

The main objective of this study was to analyze the performance of three types of green roofs and one conventional roof based on the control of quality and quantity of the stormwater runoff in Florianópolis, southern Brazil. Four micro-scale prototypes were constructed, which simulated a conventional roof with corrugated fiber cement tiles and three types of green roofs, i.e., two modular (high modular and low modular) and one continuous. Data were obtained from 35 rainfall events from June 2016 through January 2017. The control of stormwater runoff was analyzed based on the runoff coefficient and the potential of retention per unit area in the four prototypes. For the qualitative analysis samples were collected from the flow of each prototype and also from rainwater collected directly from the atmosphere. The parameters evaluated were: pH, turbidity, apparent color, dissolved oxygen, iron, nitrite, nitrate, ammonia, phosphorus, phosphate, total coliforms and thermotolerant coliforms. Results were assessed using the statistical methods t-test, Mann-Whitney and Kruskal-Wallis. In order to quantify the potential for potable water savings that can be achieved with a rainwater harvesting system installed in houses with green roof or conventional roofs, computer simulations were performed using the Netuno computer program. The results showed the high potential of rainwater retention of the green roofs. The average runoff coefficient for green roofs was 0.16 for high modular, 0.24 for low modular and 0.35 for continuous. On the other hand, the average runoff coefficient observed for conventional roof was 0.92. It was verified that the rainwater control of green roofs proved to be very sensitive to type of system used, antecedent humidity condition and amount of rainfall. As for the qualitative analysis of water, by comparing the results with the Brazilian regulation NBR 15.527, which defines quality standards for non-potable restrictive uses, it was noted that only the pH value obtained for high modular green roof has achieved the restriction specified by the regulation. In addition, results demonstrate that green roofs behave as a source of iron, nitrate, phosphorus and phosphate. The highest release of pollutants was noted in the continuous green roof, which used a thick substrate layer. During the monitoring, it was observed that the variation of some parameters in the runoff was influenced by some factors such as seasonality, age and type of green roof, maintenance and amount of rainfall. Finally, considering that runoff from such roofs could be used for non-potable uses, the simulations indicated that the potential for potable water savings is strongly dependent on the catchment area and the water

demand, especially in green roofs. The potential for potable water savings obtained ranged from 8.66 to 44.99%. For the conventional roof it ranged from 25.72 to 46.21%. Thus, this study showed the importance of analyzing different configurations of green roofs in different locations, since their behavior in the quality and quantity control of stormwater runoff is influenced by its intrinsic and extrinsic characteristics.

**Key words:** Green roofs, storm water retention, potable water savings, rainwater harvesting runoff quality

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de uma cobertura verde extensiva. ....	29
Figura 2 - Bancada de madeira para instalação dos protótipos. ....	69
Figura 3 - Impermeabilização das caixas com lona plástica para instalação das coberturas verdes. ....	70
Figura 4 - Substrato comercial e grama da espécie São Carlos utilizados nas coberturas verdes. ....	70
Figura 5 – Cobertura verde modular alta.....	71
Figura 6 - Montagem da cobertura verde modular alta. ....	72
Figura 7 – Cobertura verde modular baixa.....	73
Figura 8 – Montagem da cobertura verde modular baixa.....	74
Figura 9 - Montagem da cobertura verde contínua. ....	75
Figura 10 – Cobertura convencional com telha de fibrocimento. ....	76
Figura 11 - Pluviômetro instalado nas imediações da bancada dos protótipos.....	77
Figura 12 - Sistema de coleta do escoamento pluvial. ....	79
Figura 13 - Kit de comparação colorimétrica utilizado para determinar a concentração de amônia. ....	86
Figura 14 - Fotocolorímetro utilizado para determinação da concentração de ferro, fósforo, fosfato, nitrito e nitrato.....	87
Figura 15- Aparelhos utilizados no Laboratório de Potabilização das Águas para determinação de alguns parâmetros. ....	87
Figura 16 - Cartelas Colilert® utilizadas para determinação dos coliformes totais e termotolerantes.....	88

Figura 17 - Comparativo entre as precipitações mensais da série histórica (1961-1990) e as precipitações monitoradas para o período de estudo na cidade de Florianópolis. ....	95
Figura 18 – Evolução das coberturas verdes durante o monitoramento.	96
Figura 19 - Altura da precipitação de cada evento monitorado. ....	97
Figura 20 - Valores de coeficiente de escoamento obtidos para cada cobertura analisada nos eventos monitorados. ....	98
Figura 21 - Valores de pH encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior, os triângulos em verde correspondem à média dos dados. ....	112
Figura 22 - Valores de cor aparente encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior, os triângulos em verde correspondem à média dos dados. ....	114
Figura 23 - Valores de turbidez encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados. ....	116
Figura 24-Valores da concentração de oxigênio dissolvido encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.....	119

Figura 25- Valores da concentração de ferro (Fe) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.....	120
Figura 26 - Valores da concentração de amônia (N-NH <sub>3</sub> ) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.....	122
Figura 27 - Valores da concentração de nitrito (N-NO <sub>2</sub> ) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.....	124
Figura 28 - Valores da concentração de nitrato (N-NO <sub>3</sub> ) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.....	126
Figura 29 - Valores da concentração de fósforo (P) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.....	128
Figura 30 - Valores da concentração de fosfato encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento.	

Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados. .... 131

Figura 31 – Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40% e número de moradores igual a 4. .... 138

Figura 32 – Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40% e número de moradores igual a 2. .... 140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características de cada tipo de cobertura verde...	28
Tabela 2 - Valores de coeficiente de escoamento superficial em eventos de chuva distintos. ....	35
Tabela 3 - Retenção média para cada sistema de cobertura verde. ....	37
Tabela 4 - Retenção média para coberturas com diferentes inclinações. ....	38
Tabela 5 - Concentrações mínimas e máximas de alguns parâmetros analisados no estudo de Farias (2012).....	50
Tabela 6 – Concentrações médias, mínimas e máximas de alguns parâmetros analisados no estudo de Pessoa (2016).....	53
Tabela 7 - Resultados de qualidade da água obtidos no estudo de Gregoire e Clausen (2011). ....	54
Tabela 8 - Parâmetros para qualidade da água para fins não potáveis. .	60
Tabela 9 - Variação do potencial de retenção em diferentes estudos. ....	64
Tabela 10 - Ensaio de qualidade da água realizados.....	89
Tabela 11 – Características de cada evento monitorado e os respectivos valores de coeficientes de escoamento superficial obtidos para cada cobertura.....	99
Tabela 12 - Valores mínimos, máximos e médios de coeficiente de escoamento superficial para cada sistema em eventos leves, moderados e fortes.....	103
Tabela 13 – Valores mínimos, máximos e médios de coeficiente de escoamento superficial para cada sistema em eventos com diferentes condições de umidade. ....	106
Tabela 14 - Capacidade de armazenamento por unidade de área de cada sistema em cada evento. ....	107

Tabela 15 - Eventos monitorados para realização da análise qualitativa. .....	110
Tabela 16 - Resultados da análise de coliformes totais e termotolerantes. .....	133
Tabela 17 - Comparativo realizado entre os resultados obtidos nas coberturas analisadas e os valores recomendados pela NBR 15.527..	135
Tabela 18 - Percentuais de dias em que a demanda é atendida completamente, parcialmente ou não atendida. ....	142



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	21
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	27
2.1	COBERTURAS VERDES	27
2.2	COMPOSIÇÃO DAS COBERTURAS VERDES	28
2.2.1	Impermeabilização	29
2.2.2	Drenagem	30
2.2.3	Filtragem	30
2.2.4	Substrato	30
2.2.5	Vegetação	31
2.3	ANÁLISE QUANTITATIVA DO ESCOAMENTO DAS COBERTURAS VERDES	32
2.4	ANÁLISE QUALITATIVA DO ESCOAMENTO DAS COBERTURAS VERDES	42
2.5	APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL	55
2.5.1	Parâmetros de qualidade da água	56
2.5.2	Documentos de referência para análise da qualidade da água não potável	58
2.5.3	Algoritmo do programa Netuno	61
2.6	SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA	63
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO</b>	67
3.1	SISTEMA DE MONITORAMENTO	68
3.1.1	Local de instalação	68
3.1.2	Sistema da bancada	69
3.1.3	Tipos de cobertura verde	69

3.1.3.1	<i>Cobertura verde modular alta</i> .....	71
3.1.3.2	<i>Cobertura verde modular baixa</i> .....	72
3.1.3.3	<i>Cobertura verde contínua</i> .....	74
<b>3.1.4</b>	<b>Cobertura convencional</b> .....	76
<b>3.1.5</b>	<b>Coleta dos dados</b> .....	77
3.1.5.1	<i>Altura pluviométrica de cada evento</i> .....	77
3.1.5.2	<i>Escoamento gerado pelos sistemas</i> .....	78
3.2	<b>ANÁLISE QUANTITATIVA</b> .....	79
<b>3.2.1</b>	<b>Determinação do coeficiente de escoamento</b> .....	80
<b>3.2.2</b>	<b>Determinação do potencial de retenção</b> .....	80
<b>3.2.3</b>	<b>Tratamento dos dados</b> .....	81
3.3	<b>ANÁLISE QUALITATIVA</b> .....	84
<b>3.3.1</b>	<b>Parâmetros a serem analisados</b> .....	84
<b>3.3.2</b>	<b>Coleta e armazenamento das amostras</b> .....	85
<b>3.3.3</b>	<b>Métodos e equipamentos utilizados na análise</b> .....	85
<b>3.3.4</b>	<b>Tratamento dos dados</b> .....	89
3.4	<b>DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL DE CADA SISTEMA</b> .....	91
<b>3.4.1</b>	<b>Dados de precipitação</b> .....	92
<b>3.4.2</b>	<b>Consumo de água potável</b> .....	92
<b>3.4.3</b>	<b>Descarte do escoamento inicial</b> .....	92
<b>3.4.4</b>	<b>Área de captação</b> .....	92
<b>3.4.5</b>	<b>Número de moradores</b> .....	93
<b>3.4.6</b>	<b>Percentual de substituição de água potável por água da chuva</b> .....	93
<b>3.4.7</b>	<b>Volume dos reservatórios</b> .....	93
<b>3.4.8</b>	<b>Análise dos dados da simulação</b> .....	94
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	95
4.1	<b>PRECIPITAÇÕES NO PERÍODO MONITORADO</b> .....	95

4.2	ANÁLISE QUANTITATIVA.....	98
4.2.1	Coeficiente de escoamento superficial.....	98
4.2.2	Capacidade de armazenamento por unidade de área.....	106
4.3	ANÁLISE QUALITATIVA.....	109
4.3.1	pH.....	111
4.3.2	Cor aparente.....	113
4.3.3	Turbidez.....	115
4.3.4	Oxigênio dissolvido.....	118
4.3.5	Ferro.....	119
4.3.6	Nitrogênio.....	122
4.3.7	Fósforo.....	128
4.3.8.	Coliformes totais e termotolerantes.....	132
4.3.9	Comparativo com a NBR 15.527.....	135
4.4	POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL DE CADA SISTEMA.....	136
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
5.1	ANÁLISE QUANTITATIVA.....	145
5.2	ANÁLISE QUALITATIVA.....	147
5.3	POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL .....	149
5.4	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	151
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA ANALISADOS .....</b>	<b>165</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NO PROGRAMA NETUNO .....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE C – VOLUME DO RESERVATÓRIO IDEAL E O CORRESPONDENTE POTENCIAL DE ECONOMIA</b>	

**DE ÁGUA POTÁVEL PARA CADA COBERTURA  
ANALISADA. ....175**

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da população urbana tem ocorrido de forma rápida e não planejada, principalmente nos países em desenvolvimento. No Brasil, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), o grau de urbanização passou de 75,6% em 1991, para aproximadamente 84,4% em 2010. Neste cenário, novas edificações e obras de infraestrutura (ruas, passeios públicos, estacionamento etc.) são necessárias para atender a população.

O crescimento acelerado das cidades e o consequente aumento das áreas impermeáveis contribuem para alteração do ciclo hidrológico natural da água. Com a modificação da cobertura natural do solo as etapas de evapotranspiração e infiltração são reduzidas, aumentando assim, a vazão e o volume do escoamento superficial urbano (PINTO, 2007). Além disso, a ausência de transpiração pela vegetação ocasiona aumento da temperatura e diminuição da umidade do ar (BERNDTSSON, 2010).

A introdução de superfícies impermeáveis também causa modificações no âmbito qualitativo da água escoada. Segundo Tucci (2004), no escoamento superficial urbano os principais poluentes encontrados são: metais pesados, sedimentos, nutrientes, substâncias que consomem oxigênio, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e vírus patogênicos. É importante destacar que as áreas impermeáveis não originam poluentes, contudo elas impedem sua absorção, aumentam sua concentração e os despejam em cursos da água, degradando a qualidade das águas receptoras (MARTIN, 2008). Segundo Berndtsson, Emilsson e Bengtsson (2006), usualmente o escoamento urbano possui mais carga poluente que a água precipitada, sendo que sua qualidade depende de sua origem.

O sistema clássico de drenagem da água da chuva tem por base os preceitos das técnicas higienistas, inicialmente utilizadas na Europa no século XIX e que têm por princípio o rápido escoamento da água da chuva do meio urbano. Os conceitos higienistas foram adotados em escala mundial e vigoram até os dias atuais. Contudo, com a intensa urbanização a partir de meados do século XX, surgiram algumas limitações dos sistemas clássicos de drenagem, tais como: transferência dos problemas de inundação para jusante e comprometimento do sistema devido à impermeabilização excessiva do solo, pontos da rede subdimensionados ou mau funcionamento devido a entupimentos (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

Nas últimas décadas do século XX, percebeu-se uma maior preocupação mundial sobre as questões ambientais e a qualidade de vida da população (BERNDTSSON; EMILSSON; BENGTTSSON, 2006). A partir da década de 70, uma nova abordagem começou a ser desenvolvida na Europa e na América do Norte para gestão da água da chuva. Estas novas técnicas, conhecidas como “compensatórias”, buscam amortecer os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, por meio do controle dos excedentes de água decorrentes da impermeabilização e evitando a rápida transferência do escoamento superficial para jusante (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Com base nestes conceitos, novas soluções para o gerenciamento da água da chuva vêm ganhando espaço, destacando-se os conceitos como “Desenvolvimento de baixo impacto” (*Low Impact Development – LID*), na América do Norte e “Sistemas de drenagem urbana sustentável” (*Sustainable Drainage Systems – SUDS*), no Reino Unido. Estas soluções baseiam-se no gerenciamento da água da chuva por meio da utilização de soluções que reproduzam o ciclo hidrológico natural da água. Com a adoção de técnicas de armazenamento, infiltração, evapotranspiração e retenção do escoamento superficial urbano é possível obter o controle qualitativo da água da chuva, reduzindo assim, os impactos causados pela urbanização (*Department of Environmental Resources – Maryland, 1999*).

No Brasil, o Ministério das Cidades, por intermédio do manual para apresentação de propostas, tem estimulado a utilização das soluções de desenvolvimento de baixo impacto para implantação e ampliação dos sistemas de drenagem (BRASIL, 2012). Porém, a utilização destas técnicas nas edificações ainda é pouco difundida e carece de incentivos governamentais à população e aos pesquisadores a fim de que sejam adotadas.

Além do controle quantitativo da água da chuva, que reduz o volume do escoamento, a utilização desta água também é uma importante medida a ser adotada em edificações sustentáveis, visto que propicia uma significativa redução do uso de água potável. Por meio de simulação computacional é possível determinar o potencial de economia de água potável que um sistema de utilização de água da chuva pode adquirir (GHISI; FERREIRA, 2007; GHISI, OLIVEIRA, 2007). Contudo, uma dificuldade associada a estes sistemas corresponde à qualidade desta água, que deve estar dentro dos parâmetros recomendados ao uso em que irá se destinar (TEIXEIRA, 2013).

Tendo em vista que a cobertura das edificações corresponde a uma parcela significativa da área impermeabilizada dos grandes centros, o uso

de coberturas verdes é uma técnica com elevado potencial para minimizar os efeitos causados pela urbanização e melhorar a qualidade ambiental das cidades (CARTER; RASMUSSEN, 2006; TEEMUSK; MANDER, 2007).

Por meio da capacidade de infiltração, retenção e evapotranspiração, as coberturas verdes contribuem para gestão da água da chuva na fonte, retardando e reduzindo o escoamento superficial decorrente da impermeabilização de superfícies (BERNDTSSON, 2010). Elas também melhoram o conforto térmico e acústico da edificação e, se aplicadas em grande escala, diminuem o efeito das ilhas de calor formadas nos grandes centros (LAZZARIN; CASTELLOTTI; BUSATO, 2005; ALEXANDRI; JONES, 2008; JAFFAL; OULDBOUKHITINE; BELARBI, 2012).

Diferentes pesquisas mostram que as características das coberturas verdes referentes à inclinação, ao tipo e espessura da camada de substrato, ao *design* da camada de drenagem e ao tipo de vegetação utilizada influenciam sua capacidade de reter o escoamento pluvial (GETTER; ROWE; ANDRESEN, 2007; VILLARREAL; BENGTSSON, 2005; SANTOS *et al.*, 2013; HARPER *et al.*, 2015; LEE; LEE; HAN, 2015). Além disso, Wong e Jim (2014) afirmam que os fatores meteorológicos externos como temperatura, velocidade do ar, umidade e radiação solar afetam a taxa de evaporação e transpiração das coberturas verdes. Estas funções alteram a umidade do solo e consequentemente sua capacidade de retenção de água. Deste modo, como as características climáticas variam dentro de cada zona bioclimática, é importante desenvolver estudos regionais para avaliação do comportamento de cada sistema em localidades com climas distintos. Uma maneira de determinar a resposta de um sistema de cobertura verde em uma região particular consiste no monitoramento da precipitação e do escoamento gerado em sua superfície por um período de tempo (MARTIN, 2008). Assim, é possível determinar variáveis hidrológicas que caracterizem o comportamento da cobertura no controle do escoamento pluvial, como o valor do coeficiente de escoamento superficial, a capacidade de retenção, o atraso e diminuição do fluxo de pico.

Com relação à qualidade da água escoada, as coberturas verdes podem agir como um filtro, contribuindo para melhora do escoamento. Por outro lado, ela também pode se comportar como uma fonte de poluentes, que podem ser liberados pelo solo, pela vegetação ou pelo uso de fertilizantes (VIJAYARAGHAVAN; JOSHI; BALASUBRAMANIAN, 2012). Deste modo, os componentes presentes no escoamento da água variam conforme a configuração da cobertura

verde utilizada e a composição da camada do substrato (TEEMUSK; MANDER, 2007).

Existe uma grande quantidade de trabalhos nacionais e internacionais que abordam a qualidade da água escoada por coberturas convencionais. Contudo, existe uma carência em estudos que analisem a qualidade do escoamento gerado por coberturas verdes, principalmente no Brasil, visto que esta técnica ainda é pouco difundida no país.

Neste contexto, visto que o comportamento das coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento pluvial possui grande variabilidade e é influenciado por fatores intrínsecos e extrínsecos, surge a necessidade de avaliar o desempenho hidrológico deste tipo de cobertura na cidade de Florianópolis-SC.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo principal analisar o comportamento de diferentes coberturas verdes e uma cobertura convencional no controle quantitativo e qualitativo do escoamento pluvial na cidade de Florianópolis-SC.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho de diferentes tipos de cobertura verde e de uma cobertura convencional no controle quantitativo e qualitativo do escoamento pluvial;
- Verificar a capacidade de retenção do escoamento pluvial de cada cobertura por meio da determinação do coeficiente de escoamento superficial;
- Analisar a qualidade da água escoada pelos diferentes tipos de cobertura verde e pela cobertura convencional;
- Verificar se há diferença significativa entre a qualidade da água escoada pelos diferentes tipos de cobertura analisados e também entre a água da chuva coletada diretamente da atmosfera;
- Comparar a qualidade da água escoada pelas coberturas com os limites de qualidade da água recomendados pela NBR 15.527, a qual dispõe sobre os requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis;



- Determinar por meio de simulação computacional o potencial de economia de água potável que pode ser alcançado por um sistema de aproveitamento de água da chuva em edificações residenciais unifamiliares que possuam as coberturas analisadas.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está dividida em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto, citando a importância do desenvolvimento de soluções sustentáveis para drenagem urbana e caracterizando as coberturas verdes e seus benefícios. Também mostra os objetivos a serem alcançados com o desenvolvimento da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a revisão de literatura referente às coberturas verdes. Nele são descritas as principais características e estudos que avaliaram o controle quantitativo e qualitativo do escoamento gerado por esta técnica. Ainda apresenta documentos de referência utilizados para análise da qualidade da água para usos não potáveis e para irrigação. Por fim, apresenta uma breve descrição do programa utilizado para simular o potencial de economia de água potável que cada sistema avaliado pode obter caso a água escoada seja coletada e utilizada para fins não potáveis.

O terceiro capítulo descreve o método que foi utilizado no monitoramento dos protótipos que simularam as diferentes coberturas verdes e a cobertura convencional. Deste modo serão descritos o sistema de montagem, as características de cada sistema, o método utilizado para análise quantitativa e qualitativa e os métodos utilizados para tratamento e comparação dos dados. Também será descrito o programa computacional utilizado para determinação do potencial de economia de água potável de cada sistema e os dados de entrada necessários para realizar a simulação.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos após o monitoramento. Nele, são analisados e discutidos os parâmetros hidrológicos calculados para cada cobertura bem como os parâmetros físico-químicos e microbiológicos utilizados para caracterização da qualidade do escoamento. Por fim, foram avaliados os dados obtidos por meio da simulação computacional para determinação do potencial de economia de água potável para residências unifamiliares que possuam coberturas verdes ou coberturas com telha de fibrocimento.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões e as considerações finais obtidas com a pesquisa. Deste modo, mostra de

maneira geral o comportamento das coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento pluvial bem como a viabilidade de se implantar um sistema de aproveitamento de água da chuva em edificações que tenham este tipo de cobertura. Também são especificadas as limitações da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentados três apêndices. O primeiro é referente aos resultados da estatística descritiva dos parâmetros avaliados para caracterizar o escoamento de cada cobertura e a água coletada diretamente da atmosfera. O segundo e o terceiro apresentam os resultados obtidos com as simulações computacionais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 COBERTURAS VERDES

Muitas técnicas utilizadas para controle do escoamento pluvial, como bacias de retenção, sistemas de biorretenção e reservatórios de detenção, necessitam de um amplo espaço para implantação, o que não é facilmente obtido em áreas densamente urbanizadas. Diferentemente destas soluções, a utilização de coberturas verdes não necessita de grandes áreas para sua instalação (BERNDTSSON, 2010). Por meio da utilização de vegetação, elas convertem uma cobertura convencional em um espaço multifuncional, podendo substituir de 40 a 50% das áreas impermeáveis das cidades (VILLARREAL, BENGTSSON, 2005).

As coberturas verdes são um exemplo de controle do escoamento pluvial na fonte. Sua implantação sobre os telhados permite o armazenamento da precipitação no local, sendo que grande parte da água retida é devolvida à atmosfera por meio da evapotranspiração (BERNDTSSON, 2010).

Além dos benefícios proporcionados no âmbito hidrológico, a utilização de coberturas verdes oferece outras vantagens, entre as quais merecem destaque: Aumento da vida útil da cobertura onde é instalada (GETTER; ROWE, 2006), aumento do conforto térmico e contribuição para uma maior eficiência energética (NIACHOU *et al.*, 2001; PARIZOTTO, 2010; JAFFAL; OULDBOUKHITINE; BELARBI, 2012), redução das temperaturas superficiais externas e sua amplitude de variação (PARIZOTTO, 2010), redução do efeito das ilhas de calor urbanas (LAZZARIN; CASTELLOTTI; BUSATO, 2005; ALEXANDRI; JONES, 2008), aumento da biodiversidade (GETTER; ROWE, 2006) e melhora da qualidade do ar por meio da absorção de poluentes (YANG; YU; GONG, 2008).

Em função da espessura da camada do substrato e do tipo de vegetação utilizada, as coberturas verdes podem ser classificadas em três grupos principais (GETTER; ROWE, 2006; HUI, 2006):

Intensiva: possui a camada de substrato mais espessa, podendo abrigar vegetação de grande porte, arbustos e até mesmo árvores. Necessita de manutenção constante, exige grande suporte estrutural e deve ser instalada em coberturas planas;

Semi-Intensiva: possui espessura do substrato intermediária e pode abrigar vegetação de pequeno e médio porte;

Extensiva: é mais leve, apresentando uma camada de substrato com menor espessura e vegetação de pequeno porte. Pode ser instalada em coberturas com declividade moderada.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características de cada tipo de cobertura verde.

**Tabela 1 – Principais características de cada tipo de cobertura verde.**

<b>Características</b>	<b>Extensiva</b>	<b>Semi-Intensiva</b>	<b>Intensiva</b>
<b>Espessura do substrato</b>	e < 15 cm	e ~ 15cm	e > 15cm
<b>Acessibilidade ao local</b>	Geralmente inacessível	Parcialmente acessível	Usualmente acessível
<b>Peso Saturado</b>	Baixo 70 - 170kg/m <sup>3</sup>	Moderado 170 - 290kg/m <sup>3</sup>	Elevado 290 - 970kg/m <sup>3</sup>
<b>Diversidade da vegetação</b>	Baixa	Moderada	Elevada
<b>Custo</b>	Baixo	Variado	Elevado
<b>Manutenção</b>	Mínima	Variada	Elevada

Fonte: Adaptado de Hui (2006).

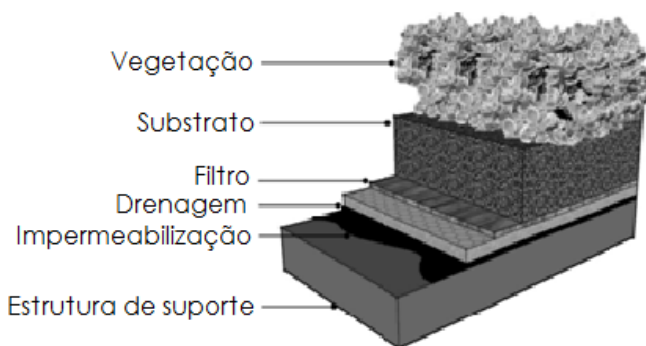
Em função de sua constituição, as coberturas verdes também podem ser classificadas em dois tipos principais de sistema, contínuo e modular. No sistema contínuo, a camada de substrato é apoiada diretamente na laje, sobre uma camada impermeabilizante e uma manta antirraízes. Por sua vez, no sistema modular, as camadas de substrato e de vegetação são apoiadas em módulos dispostos sobre a laje devidamente impermeabilizada (TEIXEIRA, 2013). Especialistas em coberturas verdes afirmam que o uso de módulos plásticos contribui para redução do peso total da estrutura verde, sem comprometer o desempenho das mesmas (BIANCHINI; HEWAGE, 2012).

## 2.2 COMPOSIÇÃO DAS COBERTURAS VERDES

Usualmente, as coberturas verdes são compostas por cinco camadas principais, correspondendo à drenagem, ao substrato, à vegetação, à filtragem e à impermeabilização (MENTES; RAES; HERMY, 2003). A Figura 1 apresenta a disposição destas camadas.

O *design* de cada componente depende da capacidade de suporte da edificação e dos objetivos almejados (GETTER; ROWE, 2006). Chenani, Lehvävirta e Häkkinen (2015) afirmam que o bom planejamento da cobertura verde deve levar conta a inclinação do telhado, a exposição solar, as condições climáticas locais e a disponibilidade de materiais na região. Os subitens a seguir descrevem brevemente a função de cada camada da cobertura verde e alguns dos materiais que podem ser utilizados.

**Figura 1 - Camadas de uma cobertura verde extensiva.**



Fonte: Adaptado de Martin (2008).

### **2.2.1 Impermeabilização**

A camada de impermeabilização é localizada imediatamente acima da estrutura de apoio da cobertura verde, e tem por objetivo principal evitar que ocorra infiltração na edificação (MENTES; RAES; HERMY, 2003; BLISS; NEUFELD; RIES, 2009). Isto é obtido por meio da utilização de mantas ou membranas, que podem ser asfálticas, termoplásticas, elastoméricas ou de betume. Resinas e bases também são opções disponíveis comercialmente para evitar a presença de água e umidade no telhado (JOBIM, 2013). Algumas vezes, acima desta camada é colocada uma manta antirraízes, a fim de evitar que a raiz da vegetação penetre a camada de impermeabilização ou a estrutura do telhado (BLISS; NEUFELD; RIES, 2009).

### 2.2.2 Drenagem

A camada de drenagem tem por objetivo principal permitir que o excesso de água seja drenado para fora do sistema (GETTER; ROWE, 2006). Ela é responsável pelo balanço entre ar e água na cobertura verde (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Dependendo do *design* e do tipo de material utilizado ela pode exercer funções adicionais como armazenamento de água, alargamento da zona de raízes, espaço para maior aeração do sistema e aumento do isolamento térmico da edificação (HENEINE, 2008; LAZZARIN; CASTELLOTTI; BUSATO, 2005). De acordo com Vijayaraghavan (2016) os dois tipos de camadas de drenagem usualmente utilizados correspondem a:

- Módulos plásticos: são feitos com materiais de alta resistência e podem ser utilizados tanto para drenar água quanto para armazená-la em seus compartimentos;
- Materiais granulares: materiais leves que possuem elevada porosidade, como argila expandida, vermiculita ou cascalhos.

### 2.2.3 Filtragem

A camada de filtragem é posicionada entre a camada de drenagem e a de substrato. Ela é responsável por filtrar a água da chuva e por impedir a passagem de partículas finas para as camadas inferiores, evitando assim o entupimento do sistema (CHENANI; LEHVÄVIRTA; HÄKKINEN, 2015). A passagem destas partículas também pode causar um impacto negativo na qualidade do escoamento gerado pela cobertura verde (MARTIN, 2008).

### 2.2.4 Substrato

A camada de substrato é responsável por servir de suporte para fixação das raízes das plantas, bem como oferecer água e nutrientes para seu desenvolvimento (TASSI *et al.*, 2014). Segundo Vijayaraghavan (2016), a escolha do substrato ideal é um dos principais fatores a se considerar quando se pretende construir uma cobertura verde. Isto se deve ao fato deste componente influenciar diretamente a qualidade da água escoada, a capacidade de retenção do escoamento pluvial e o fluxo de calor na cobertura da edificação.

A composição ideal deve possuir materiais leves, resistentes e com boa capacidade de retenção de água e nutrientes. Em algumas situações o uso de fertilizantes é necessário para o crescimento das plantas, porém, sua utilização deve ser a mínima possível, pois causa aumento das concentrações de nitrogênio e fósforo, diminuindo a qualidade do escoamento gerado na cobertura verde (GETTER; ROWE, 2006).

Devido à limitação de peso imposta aos sistemas de cobertura verde, muitos fabricantes desenvolvem seu próprio substrato, buscando uma composição que procure manter o equilíbrio entre o peso e o desempenho da cobertura (BIANCHINI; HEWAGE, 2012).

### 2.2.5 Vegetação

A vegetação corresponde à camada superficial das coberturas verdes e é responsável pela devolução de parte da água da chuva para atmosfera por meio da evapotranspiração das plantas (TASSI *et al.*, 2014). Esta camada também aumenta as áreas sombreadas da cobertura, o que promove maior refrigeração da edificação (OBERNDORFER *et al.*, 2007).

O tipo de vegetação utilizada depende de alguns fatores que devem ser levados em conta durante o projeto da cobertura verde, como: o valor estético pretendido, as condições climáticas locais, incluindo o macro e o microclima, a espessura e o tipo do substrato utilizado, as características de cada espécie de planta e as condições de instalação (GETTER; ROWE, 2006). Para coberturas verdes extensivas é favorável que a vegetação seja resistente a períodos secos, exija pouca manutenção, tenha raízes curtas, se multiplique rapidamente e ofereça boa cobertura de folhas (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

No estudo de Persch *et al.* (2011) é possível verificar a importância do clima local na escolha da vegetação. Os autores analisaram a fitossanidade de diferentes espécies vegetais utilizadas em uma cobertura verde instalada na cidade de Santa Maria. As plantas da espécie *Gazania rigens* e *Chlorophytum comosum* não resistiram aos períodos de estiagem, apresentando taxa de mortalidade igual a 75% e 100%, respectivamente. Estas espécies necessitam de clima ameno e com precipitações frequentes. Por outro lado, a espécie *Kalanchoe blossfeldiana*, que é uma planta suculenta adaptada a climas quentes e com resistência ao estresse hídrico, mostrou crescente desenvolvimento durante o período de monitoramento. Deste modo, destaca-se a importância da análise das condições climáticas locais no momento de definir o tipo de vegetação.

O tipo de cobertura verde também é um fator determinante na escolha da vegetação. Nas coberturas verdes extensivas, a fina camada de substrato limita o tipo de vegetação a ser utilizada, sendo as gramíneas e as plantas do gênero *Sedum* as mais utilizadas (GETTER; ROWE, 2006; CASTLETON *et al.*, 2010). *Sedum* é um tipo de planta altamente resistente a períodos secos, devido à capacidade de armazenar água em suas folhas (CASTLETON *et al.*, 2010). Por sua vez, as gramíneas são mais dependentes de água para seu desenvolvimento, necessitando de irrigação com maior frequência (GRACESON *et al.*, 2014).

Com relação à aplicação da vegetação, elas podem ser colocadas diretamente na cobertura através da plantação de sementes. Também podem ser cultivadas em mantas ou em módulos ao nível do solo e posteriormente transferidas e fixadas na cobertura (LORENZINI, 2014). Um exemplo de fácil manuseio e aplicação são os gramados em rolo. Produzidos em ampla escala, eles necessitam de uma fina camada de substrato, de aproximadamente 2 centímetros, e possuem tamanho médio de 1,00m x 0,50m (MINKE, 2003).

## 2.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DO ESCOAMENTO DAS COBERTURAS VERDES

As coberturas verdes conseguem atenuar os impactos causados no sistema de drenagem por meio da redução e do atraso do fluxo de pico do escoamento pluvial. Diferentemente das coberturas convencionais, elas têm capacidade de reter a água da chuva, que posteriormente será evaporada e utilizada pela vegetação para transpiração, reduzindo o volume de escoamento gerado por estas coberturas (BERNDTSSON, 2010).

O escoamento gerado pela cobertura verde decorre em três etapas: atraso de seu início devido à capacidade de interceptação e absorção da água no sistema, redução de seu volume devido à retenção de parte da precipitação e por último, quando a capacidade de armazenamento do sistema é atingida, o escoamento do excesso de água ocorre durante um período de tempo maior (MENTENS; RAES; HERMY, 2006).

O desempenho hidrológico das coberturas verdes pode ser avaliado por meio da análise de uma série de parâmetros que caracterizam seu comportamento frente aos eventos de chuva. A capacidade de retenção e o coeficiente de escoamento superficial são exemplos de variáveis utilizadas para esta caracterização (MARTIN, 2008).

A retenção pode ser definida como o volume de chuva que não foi escoado pela cobertura verde, ou seja, a quantidade de água que foi



interceptada pela vegetação ou que ficou retida no substrato e na camada de drenagem (GETTER; ROWE; ANDRESEN, 2007). Ao contrário da capacidade de retenção, o valor do coeficiente de escoamento superficial indica a porção do volume de chuva que não foi captada por interceptação, infiltração ou armazenamento. Os valores do coeficiente de escoamento superficial variam de 0 a 1, sendo que as coberturas convencionais apresentam coeficientes maiores que 0,8 (JOBIM, 2013). Sendo assim, quanto melhor a capacidade de retenção da cobertura verde, menor será o valor do seu coeficiente de escoamento.

O valor destas variáveis depende de fatores como (BERNDTSSON, 2010):

- Características da cobertura verde: número de camadas, espessura e tipo de substrato, tipo de vegetação, inclinação e idade;
- Condições climáticas: antecedente de dias secos, estação do ano, clima local (temperatura e umidade do ar, velocidade dos ventos) e características da precipitação.

Mentens, Raes e Hermy (2006) analisaram os dados de estudos alemães e apresentaram a variação do coeficiente de escoamento superficial anual obtido para coberturas convencionais e coberturas verdes do tipo intensivas e extensivas. Enquanto as coberturas verdes intensivas possuem coeficiente superficial entre 0,15 e 0,30, as coberturas convencionais apresentam coeficientes maiores que 0,8, restando em média apenas 15% do escoamento. O melhor desempenho de retenção é observado nas coberturas verdes intensivas, porém, devido ao seu alto custo de implantação e manutenção e o elevado sobrepeso que ocasionam na estrutura da edificação, seu uso não é tão difundido quanto o das coberturas verdes extensivas (GETTER; ROWE, 2006).

Na literatura, é possível encontrar diversos estudos que avaliaram o desempenho hidrológico das coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento pluvial.

Carter e Rasmussen (2006) compararam o desempenho hidrológico de uma cobertura verde com uma cobertura convencional de concreto na cidade de Athens, Georgia. Após a análise de 31 eventos de chuva durante treze meses, a capacidade de retenção da cobertura verde mostrou-se satisfatória, apresentando valores entre 39 e 100%. Também se percebeu a influência da profundidade da precipitação na capacidade de retenção do escoamento. Em eventos leves (menor do que 25,4mm) a cobertura verde reteve em média 88% do total precipitado. Em eventos intensos (maior do que 76,2mm) a retenção média foi de 48%. Comparando-se os dois tipos de coberturas, a cobertura verde conseguiu

diminuir e atrasar a vazão de pico, bem como atrasar o início do escoamento para quase todos os eventos monitorados. Contudo, percebeu-se que quando o substrato encontra-se próximo do ponto de saturação do solo, o escoamento da cobertura verde se assemelha muito ao escoamento da cobertura convencional.

Em estudo semelhante realizado na Estônia, Teemusk e Mander (2007) compararam o escoamento gerado por uma cobertura verde com uma cobertura convencional de betume, frequentemente usada na região. O escoamento pluvial gerado pelas coberturas foi analisado em dois eventos de chuva leve e em um evento de tempestade. No primeiro evento de chuva leve, que durou aproximadamente 30 horas, a altura de precipitação foi igual a 2,1 mm. O escoamento gerado foi igual a 1,9 mm na cobertura de referência e 0,3 mm na cobertura verde. O segundo evento de chuva leve obteve resultados semelhantes ao primeiro. No evento de tempestade, que ocorreu durante seis dias, a altura total de precipitação foi igual a 18,2 milímetros. O escoamento gerado foi igual a 17,8 mm para a cobertura verde e 17,5 mm para a cobertura de referência. Os resultados mostraram que a cobertura verde pode reter efetivamente eventos de chuva leve, retendo em média 89,7% da precipitação incidente. Porém, em eventos de tempestade, a água escoou de maneira semelhante à cobertura convencional. Como no estudo de Carter e Rasmussen (2006), os autores identificaram a influência da profundidade da precipitação na capacidade de retenção das coberturas verdes.

No estudo de Lee *et al.* (2013), realizado na Coreia, avaliou-se o controle do escoamento pluvial de uma cobertura verde frente a eventos de chuva com condições distintas. Para isso montou-se um protótipo de cobertura verde extensiva e simularam-se eventos de chuva em laboratório, variando-se a altura, a intensidade e a duração da precipitação. A condição de saturação do solo da cobertura também foi analisada, variando-se o número de dias sem precipitação que antecederam o evento. Os resultados mostraram que a capacidade de retenção tem relação inversamente proporcional com a intensidade e o volume da precipitação. Com relação ao antecedente de dias secos, percebeu-se que o volume retido aumentou de forma linear com o número de dias sem precipitação, estabilizando após três dias. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para o coeficiente de escoamento superficial em diferentes condições de eventos chuvosos. O estudo mostra como as características do evento e a condição de saturação influenciam no controle do escoamento pluvial das coberturas verdes. Em uma situação de precipitação intensa em que o substrato encontra-se com umidade elevada, a cobertura verde comporta-se como uma cobertura

convencional, apresentando valor de coeficiente superficial superior a 0,90.

**Tabela 2 - Valores de coeficiente de escoamento superficial em eventos de chuva distintos.**

Antecedente de dias secos	Precipitação			Coeficiente de escoamento superficial
	Duração (h)	Altura (mm)	Intensidade (mm/h)	
3	3	10	3,33	0,00
3	7	50	7,14	0,44 - 0,52
3	11	95	8,64	0,69
0,5	2	80	40,00	0,91

Fonte: Adaptado de Lee *et al.* (2013).

Na cidade de Yubei, na China, Zhang *et al.* (2015) analisaram a capacidade de retenção do escoamento pluvial de uma cobertura verde e de uma cobertura convencional. Os resultados mostraram que o desempenho da cobertura verde foi satisfatório, com valores de retenção no intervalo de 35,5 a 100,0%, sendo a média igual a 77,2%. Observou-se que nos meses com menor volume de precipitação e temperaturas mais elevadas a eficiência da cobertura verde foi maior, mostrando a influência do clima e do índice pluviométrico no comportamento desta técnica. Além disto, os autores classificaram cada evento analisado de acordo com a respectiva altura pluviométrica, de modo a verificar a relação entre o volume precipitado e a capacidade de retenção da cobertura verde. Para eventos leves, com altura pluviométrica menor que 10mm, a capacidade de retenção foi maior que 94,0%. Por outro lado, em eventos com altura pluviométrica maior que 50mm, a capacidade de retenção foi próxima a 39,0%. Contudo, é importante destacar que o menor valor não foi obtido no evento com maior altura pluviométrica, mas sim no evento em que a cobertura verde estava próxima da condição de saturação. Em consonância com o estudo de Lee *et al.* (2013), verifica-se que a condição de umidade antecedente também é um fator determinante na eficiência das coberturas verdes.

Tendo em vista que o desempenho hidrológico das coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano também é influenciado pelas suas características construtivas, algumas pesquisas analisaram se as variações destas características alteram significativamente a eficiência da cobertura verde.

No estudo de Lee, Lee e Han (2015), realizado na Coreia do Sul, analisou-se o desempenho de coberturas verdes com diferentes alturas de substrato. Montaram-se dois protótipos em microescala, indicados como C e D, com espessura do substrato igual a 15 e 20 centímetros, respectivamente. Foram simulados sete eventos de chuva, durante um período de quatro meses. Os resultados obtidos mostraram que nas precipitações com altura menor que 7,5 mm não houve escoamento superficial. No entanto, para uma chuva com altura de 42,5 mm, houve uma redução do escoamento igual a 26,3% e 42,8% para os protótipos C e D, respectivamente. A redução média obtida foi igual a 27% para o protótipo C e 49% para o protótipo D. Como conclusão, os autores perceberam uma influência significativa no potencial de retenção de água para cobertura verde com maior altura de substrato. Em consonância com outros estudos, o antecedente de dias secos mostrou-se um fator significativo no desempenho hidrológico das coberturas verdes.

Beecham e Razzaghamanesh (2015) analisaram o comportamento no controle quantitativo do escoamento pluvial de diferentes tipos de coberturas verdes instaladas em Adelaide, no sul da Austrália. Foram construídos dezesseis protótipos com variação na inclinação (1° e 25°), na espessura do substrato (10 e 30 cm), no tipo do substrato e na presença de vegetação. Os resultados indicaram que as coberturas verdes vegetadas apresentaram elevada eficácia no controle do escoamento pluvial, com retenção média entre 78,13 e 89,66%. O melhor desempenho foi obtido no protótipo com maior espessura do substrato e menor inclinação. Para as coberturas em que não se utilizou vegetação, os resultados para retenção média foram inferiores, no intervalo de 63,74 a 67,66%. O estudo indica a importância da camada de vegetação nas coberturas verdes, pois devido à sua atividade de evapotranspiração contribui para o restabelecimento da capacidade de retenção.

Em Hong Kong, Wong e Jim (2014) analisaram a influência da espessura do substrato e da adição de lã de rocha no desempenho hidrológico das coberturas verdes. Foram montados quatro protótipos distintos, variando-se a espessura do substrato (40 e 80 mm) e a presença de uma camada de lã de rocha. Foram monitorados 63 eventos de chuva no período de dez meses. Os resultados referentes à retenção média dos sistemas analisados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Retenção média para cada sistema de cobertura verde.**

Altura pluviométrica	Número de eventos	Retenção média (%)			
		40mm	40mm com lâ de rocha	80mm	80mm com lâ de rocha
Leve (<2mm)	19	72,6	75,8	83,9	75,8
Moderada (2 - 10mm)	18	36,8	35,9	45,8	46,7
Forte (>10mm)	26	15,7	16,7	16,7	18,9
Total	63	38,9	40,0	45,3	44,3

Fonte: Adaptado de Wong e Jim (2014).

O sistema com espessura de substrato de 80 mm e sem adição de lâ de rocha apresentou um desempenho levemente superior aos outros sistemas, com uma retenção média de 45,3%. Porém, utilizando o método estatístico ANOVA, verificou-se que não existe diferença significativa entre os resultados obtidos para os quatro tratamentos. Deste modo, não foi possível afirmar que a altura do substrato ou a adição de lâ de rocha são fatores que alteram significativamente a capacidade de retenção do escoamento pluvial. Por outro lado, a profundidade da precipitação mostrou-se um fator significativo, alterando o desempenho hidrológico de todos os tratamentos avaliados. Durante as chuvas leves os protótipos retiveram em média 77% do escoamento enquanto que nos eventos intensos, apenas 17%.

Como principal conclusão, foi visto que a altura da camada de substrato não causou diferenças significativas na capacidade de retenção do escoamento, divergindo do resultado obtido por Lee, Lee e Han (2015). Essa variação de resultados pode ocorrer devido à elevada pluviosidade da cidade de Hong Kong, que faz com que a camada de substrato esteja quase sempre próxima do ponto de saturação, sendo sua espessura pouco influenciável. Contudo, mesmo em condições de elevada umidade, as coberturas verdes analisadas foram eficazes no controle e retardo do escoamento pluvial, principalmente em eventos leves e moderados.

Outro fator que pode influenciar a capacidade de retenção do escoamento das coberturas verdes é o tipo de substrato utilizado. No estudo de Harper *et al.* (2015), realizado em Missouri nos EUA, foram monitorados protótipos de telhado verde com dois tipos de substrato

diferentes por nove meses. O substrato com maior capacidade de armazenamento conseguiu reter 20% a mais do escoamento. Os autores também avaliaram a influência da presença de vegetação no desempenho hidrológico das coberturas verdes. Semelhante ao obtido por Beecham e Razzaghamanesh (2015), os resultados mostraram que o potencial de retenção foi maior nas coberturas vegetadas para os dois tipos de substrato analisados.

Getter, Rowe e Andresen (2007) desenvolveram um estudo na cidade de East Lansing, nos EUA. Os autores analisaram a influência da declividade no potencial de retenção da água das coberturas verdes. Foram monitorados protótipos em microescala (2,44m x 2,44m) com quatro declividades distintas (2%, 7%, 15% e 25%) por um período de dezessete meses. Por meio de análise estatística, com aplicação do teste ANOVA, verificou-se que a declividade da cobertura, a altura da precipitação e a interação entre estes dois fatores interferem no desempenho das coberturas verdes. Na Tabela 4 é possível observar que os valores de retenção média das coberturas verdes decrescem com o aumento da declividade e com a altura da precipitação. Outra análise realizada pelos autores mostrou a influência da condição de saturação do solo. Em uma chuva de 42,2 mm onde o solo encontrava-se seco, a retenção média das coberturas foi de 62%, mas em uma chuva de 28,7mm onde o solo encontrava-se úmido, a retenção média dos protótipos foi igual a 33%.

**Tabela 4 - Retenção média para coberturas com diferentes inclinações.**

<b>Altura da chuva</b>	<b>Retenção média (%)</b>				
	<i>2%</i>	<i>7%</i>	<i>15%</i>	<i>25%</i>	<i>Média</i>
Leve (<2mm)	93,3	94,0	94,0	95,5	94,2
Moderada (2 - 10mm)	92,2	89,5	88,6	87,8	89,5
Forte (>10mm)	71,4	66,4	58,4	57,1	63,3
Média	85,2	82,2	78,0	75,3	80,2

Fonte: Adaptado de Getter, Rowe e Andresen (2007).

Em estudo similar realizado na Suécia, Villarreal e Bengtsson (2005) analisaram protótipos de coberturas verdes em microescala, com declividades distintas (2°, 5°, 8° e 14°), em seis eventos de chuva simulados em laboratório. Com relação à retenção, os autores observaram que menores declividades proporcionam maior capacidade de

armazenamento de água. Também verificaram que chuvas mais intensas diminuem a capacidade de retenção da cobertura verde nos casos em que a umidade inicial do substrato é nula. Para uma chuva com intensidade de 24mm/h, reteve-se 62, 43 e 39% do total precipitado para as coberturas com declividade de 2°, 8° e 14°, respectivamente. A retenção correspondente para uma chuva 78mm/h foi igual a 21% para a cobertura com declividade de 2° e apenas 10% para a cobertura com declividade de 14°.

Em âmbito nacional, na cidade de Caruaru, em Pernambuco, Santos *et al.* (2013) analisaram o escoamento gerado em dois protótipos de coberturas verdes com vegetação distinta e um protótipo de referência, simulando um telhado convencional de telhas cerâmicas. Foram simulados dois eventos de chuva, com diferentes intensidades. Os resultados indicaram que o tipo de vegetação utilizada não alterou a capacidade de retenção da cobertura verde. Em uma chuva com intensidade de 42mm/h a retenção dos protótipos verdes foi de aproximadamente 30% (32,1% para cobertura com cacto e 33,6% para cobertura com grama), mas no caso de uma chuva com intensidade de 72mm/h, os valores foram aproximadamente iguais a 15% (14,2% para cobertura com cacto e 15,5% para cobertura com grama). Esta semelhança na capacidade de retenção pode ter ocorrido devido à grama estar envelhecida no período de medição, diminuindo a densidade de suas folhas. Contudo, percebeu-se que a intensidade e precipitação pluviométrica influenciaram a capacidade de retenção das coberturas verdes.

Neste mesmo sentido, em Buenos Aires, Rossato *et al.* (2015) realizaram um estudo com objetivo de avaliar a retenção e o atraso do escoamento gerado por coberturas verdes com diferentes tipos de vegetação. O método adotado consistiu no monitoramento de protótipos de cobertura verde com área igual a 0,25m<sup>2</sup> no período de um ano. Os potenciais de retenção obtido nas coberturas verdes analisadas foram altos, sendo igual a 100% em precipitações menores que 20mm, para todos os protótipos. Como em outros estudos, observou-se uma relação inversamente proporcional entre o potencial de retenção e o volume de chuva. Em eventos com altura pluviométrica maior que 90mm, a porcentagem retida nas coberturas variou entre 11% e 22%. Por meio do método estatístico de análise de variância F, verificou-se que apenas o protótipo que utilizou plantas da espécie *Aptenia cordifolia* apresentou comportamento significativamente inferior aos demais, mostrando a pequena influência do tipo de vegetação utilizada, como indicado por Santos *et al.* (2013). Foi visto também que a presença de manutenção não

interferiu significativamente no comportamento destas coberturas. Contudo, um maior período de monitoramento poderia revelar um comportamento distinto em relação a esta variável.

A maior parte da literatura é referente a pesquisas que avaliaram coberturas verdes extensivas do tipo contínuo. Poucos estudos realizaram a análise do desempenho hidrológico de coberturas verdes do tipo modular.

Em âmbito internacional, Gregoire e Clausen (2011) analisaram a capacidade de retenção do escoamento de uma cobertura verde modular, instalada em uma praça localizada no topo de um edifício, em Connecticut, nos EUA. Os resultados mostraram que a cobertura verde reteve 41,6% da precipitação ocorrida no período de estudo, equivalente a treze meses.

Algumas pesquisas nacionais, realizadas na Universidade Federal de Santa Maria, utilizaram sistemas modulares na avaliação do comportamento hidrológico de coberturas verdes. No estudo de Jobim (2013), avaliou-se o desempenho de quatro sistemas de coberturas verdes modulares comerciais no controle quantitativo da água da chuva. A presença de argila expandida em cada sistema também foi analisada. Após quatro meses de monitoramento, encontrou-se que coeficiente de escoamento médio obtido para os sistemas variou de 0,13 a 0,44, mostrando que os sistemas modulares estudados possuem uma boa capacidade de retenção da água da chuva, conseguindo reter até 14,2mm/m<sup>2</sup>. As coberturas convencionais apresentam coeficiente superficial entre 0,8 e 1,0, ou seja, elas transformam mais de 80% do total precipitado em escoamento. Com relação à condição de saturação do solo, não foi possível identificar uma relação entre a capacidade de retenção das coberturas verdes com a umidade antecedente do solo. A utilização de uma maior representatividade de dados ou a análise da profundidade da precipitação de cada evento poderia conduzir a resultados mais conclusivos. Ao final do estudo, o autor concluiu que o tipo de sistema modular utilizado bem como a adição de materiais drenantes, como a argila expandida, são fatores que influenciam a eficiência de retenção da água da chuva das coberturas verdes.

No estudo de Tassi *et al.* (2014) os autores compararam a eficiência no controle quantitativo do escoamento pluvial de uma cobertura verde modular com uma cobertura convencional com telha de fibrocimento. Após o monitoramento de 43 eventos de chuva ao longo de dezessete meses, verificou-se que o valor do coeficiente de escoamento superficial da cobertura verde foi menor que o obtido para cobertura convencional em todos os eventos. Em média, o coeficiente de



escoamento superficial foi igual a 0,38 para a cobertura verde e 0,87 para a cobertura convencional. Considerando-se a capacidade de armazenamento, a cobertura verde foi capaz de reter em média 12,0 mm/m<sup>2</sup>. O monitoramento também revelou que a capacidade de retenção de água é diretamente influenciada pela condição climática e pela umidade antecedente do solo. Os maiores valores de coeficiente de escoamento foram observados durante o inverno e nas situações em que o solo encontrava-se com maior disponibilidade de água. Os menores valores foram obtidos durante o verão, quando as taxas de evapotranspiração são maiores. Com estes resultados foi possível perceber a influência das condições climáticas e da condição de saturação da cobertura verde no controle do escoamento pluvial.

Em Porto Alegre, Castro e Goldenfum (2010) compararam o desempenho de uma cobertura verde modular com uma cobertura convencional, ambas instaladas em duas condições distintas: horizontal (terraço) e inclinada, com declividade de 15°. Após o monitoramento de oito eventos de chuva ao longo de quatro meses, os resultados mostraram que a cobertura vegetal horizontal não apresentou escoamento nas primeiras três horas de precipitação. Neste período inicial, houve escoamento no módulo vegetado inclinado apenas em quatro eventos, sendo que os volumes escoados foram menores que os volumes escoados pelas coberturas convencionais. Após doze horas de precipitação, houve redução na capacidade de retenção das coberturas verdes, porém, ainda assim elas são capazes de reter todo volume de escoamento em 25% dos eventos analisados na cobertura verde inclinada e em 63% na cobertura verde horizontal. Nesse estudo, o antecedente de dias secos não influenciou a capacidade de retenção das coberturas verdes, divergindo do resultado apresentado em outros trabalhos. Uma maior representatividade de dados poderia levar a resultados diferentes.

Pessoa (2016) avaliou o comportamento de duas coberturas verdes modulares e de uma cobertura convencional de fibrocimento no controle quantitativo do escoamento pluvial. As principais diferenças entre as duas coberturas verdes dizem respeito ao tipo de módulo e vegetação utilizada e ao tempo de instalação. A primeira foi instalada no ano 2010 e utilizou módulos de EVA e vegetação da espécie *Sedum rupestre*, enquanto a última foi instalada em 2013 e utilizou módulos hexagonais com vegetação da espécie *Plectranthus barbatus* e a *Sedum dendroideum*.

Os resultados obtidos demonstraram a eficiência das coberturas verdes em controlar o escoamento pluvial, sendo o valor do coeficiente de escoamento superficial médio igual a 0,43 para ambos os sistemas. Por outro lado, para cobertura de fibrocimento, o valor obtido para este

parâmetro foi igual a 0,83. Esse estudo também constatou que o desempenho das coberturas verdes é sensível às condições climáticas e à condição de umidade antecedente, sendo que no verão, estação em que as temperaturas apresentam-se mais elevadas, houve aumento na capacidade de retenção dos sistemas analisados.

O método adotado nos estudos revisados consiste no monitoramento de coberturas verdes em micro-escala, com a montagem de protótipos, ou em macro-escala, quando elas estão instaladas em edificações existentes. Os dados obtidos correspondem ao volume e ao comportamento do escoamento durante um evento chuvoso bem como ao volume de água precipitado. De acordo com a USEPA (2002), um evento é considerado individual quando existe um intervalo maior que seis horas sem precipitação. Na revisão bibliográfica identificaram-se os valores usualmente adotados pelos diferentes autores. Nas pesquisas de Getter, Rowe e Andresen (2007), Hathaway, Hunt e Jennings (2008) e de Wong e Jim (2014) um evento foi considerado independente quando o período sem precipitação era maior que seis horas. No estudo de Carter e Rasmussen (2006) os autores consideraram um evento individual quando o antecedente seco fosse maior ou igual a vinte e quatro horas.

Com relação ao período de monitoramento, verificou-se elevada variabilidade entre as pesquisas, sendo importante garantir uma base de dados que não comprometa a veracidade dos resultados. Após o monitoramento, o comportamento das coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento pluvial é avaliado por meio da determinação de parâmetros hidrológicos, como o coeficiente de escoamento superficial ou a capacidade de retenção. Algumas pesquisas também determinam o tempo para início do escoamento, assim como o atraso e a redução da vazão de pico. Para comparação de resultados obtidos em sistemas com diferentes características ou para verificação da influência das condições extrínsecas às coberturas, métodos estatísticos de comparação de médias são frequentemente utilizados.

## 2.4 ANÁLISE QUALITATIVA DO ESCOAMENTO DAS COBERTURAS VERDES

Segundo Berndtsson, Emilsson e Bengtsson (2006), a qualidade da água escoada por uma cobertura verde depende de vários fatores, como: características dos componentes (espessura e composição do substrato, tipo de vegetação e tipo de drenagem), idade, tipo de manutenção (uso de fertilizantes ou não), características do entorno (industrial, residencial ou rural) e fontes de poluição local.

Os principais poluentes avaliados no escoamento das coberturas verdes correspondem aos metais pesados e às distintas formas de nitrogênio e fósforo. Geralmente, os pesquisadores analisam se a cobertura verde é fonte destes poluentes por meio da comparação entre a água da chuva antes e após sua passagem pela cobertura (BERNDTSSON, 2010).

Na literatura é possível encontrar alguns estudos que analisaram a qualidade da água escoada por coberturas verdes a fim de verificar se elas atuam como fonte de poluentes ou não.

Na pesquisa de Gnecco *et al.* (2013), realizada na cidade de Gênova, na Itália, os autores avaliaram a qualidade da água drenada por uma cobertura verde intensiva. Foram analisados sete eventos de precipitação durante o período de monitoramento, equivalente a três meses. A qualidade da água da chuva, coletada diretamente da atmosfera também foi analisada.

Por meio da aplicação do método estatístico de Mann-Whitney verificou-se que a cobertura verde comportou-se como fonte de ferro, cálcio e potássio, apresentando concentrações destes parâmetros significativamente maiores que na água da chuva. Isto é justificado devido à composição do solo e à dissolução de partículas minerais no mesmo. A demanda química de oxigênio também foi maior na cobertura verde, sendo associada à maior quantidade de matéria orgânica que é liberada no escoamento. Nesse estudo verificou-se que não houve diferença significativa na qualidade da água do primeiro fluxo com o restante do escoamento. Deste modo, em caso de utilização da água escoada para usos não potáveis, o descarte do primeiro fluxo não promove melhoria da qualidade da água, sendo recomendado o tratamento da mesma. Mesmo mostrando-se como fonte de alguns poluentes, a cobertura verde apresentou alguns benefícios, sendo capaz de reter zinco e cobre e também neutralizando o escoamento pluvial.

No estudo de Berndtsson (2008), realizado na Suécia, o autor analisou a alteração da qualidade da água escoada por uma cobertura verde extensiva em diferentes estações (primavera de 2005 e 2007 e outono de 2003 e 2006), bem como as mudanças vinculadas à idade da cobertura verde. Os resultados mostraram que a passagem da água da chuva pela cobertura verde aumentou a concentração de fósforo total, fosfato, potássio e carbono orgânico dissolvido. Contudo, houve uma diminuição de nitrogênio total e de nitrato no escoamento da cobertura verde, sendo que a concentração de nitrato no escoamento chegou a ser vinte vezes menor do que a concentração na água da chuva durante o outono. As concentrações de fósforo total, nitrogênio total, fosfato e

potássio foram mais elevadas no outono do que na primavera. O contrário foi observado para as concentrações de carbono orgânico dissolvido e nitrato. Com relação à idade da cobertura verde, percebeu-se que as concentrações de fósforo total, fosfato e potássio diminuem com o passar dos anos. Isto pode ser explicado devido à menor influência causada pelos fertilizantes utilizados para a proliferação da vegetação.

Buffam, Mitchell e Durtsche (2016) analisaram a variação temporal da qualidade da água escoada por uma cobertura verde extensiva instalada em Cincinnati, Ohio. Para comparação de resultados, os autores também determinaram a qualidade da água escoada por uma cobertura convencional e a da água da chuva coletada diretamente da atmosfera. O período de monitoramento compreendeu os meses entre abril de 2011 e fevereiro de 2013. Com relação ao pH, verificou-se que a passagem da água da chuva por ambas as coberturas diminuiu sua acidez. Os intervalos de variação deste parâmetro ficaram entre 6,5 e 7,4 para a cobertura verde, 6,0 e 6,9 para cobertura convencional e 4,9 e 6,6 para água da chuva. Quanto à presença de nutrientes, os resultados mostraram que a cobertura verde atuou positivamente na retenção de amônia, apresentando média igual 0,1 mg/L. Para a cobertura convencional e para a água da chuva as concentrações médias foram iguais a 0,2 mg/L e 0,3mg/L, respectivamente. Considerando a presença de nitrato, observou-se uma variação sazonal deste parâmetro nas coberturas verdes. Nos meses de verão e outono as concentrações foram elevadas, no intervalo de 0,0 a 13,2 mg/L, enquanto no inverno e na primavera os valores ficaram entre 0,0 e 1,9 mg/L. Este mesmo comportamento foi identificado para o fosfato, sendo que no verão e no outono as concentrações ficaram entre 1,0 e 4,2 mg/L, e, nas demais estações entre 0,8 e 2,4 mg/L. Além da variação sazonal, é importante destacar que após o uso de fertilizante na cobertura verde, a concentração de nitrato aumentou consideravelmente, mostrando que a fertilização é diretamente responsável pela diminuição da qualidade do escoamento. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Berndtsson (2008).

Na Pensilvânia, Bliss, Neufeld e Ries (2009) avaliaram a qualidade do escoamento gerado por uma cobertura verde extensiva e por uma cobertura convencional. Os resultados desta pesquisa mostraram que a cobertura verde apresentou os maiores valores de demanda química de oxigênio e fósforo. A concentração de fósforo na cobertura verde variou no intervalo de 2 e 3mg/L, enquanto na cobertura de referência e na água coletada da atmosfera estes valores foram nulos ou insignificantes. As duas coberturas foram capazes de neutralizar a água da chuva. Foi visto ainda que elas não apresentaram concentrações significativas de metais,

e na cobertura verde, a concentração de nitrogênio foi nula. Com relação à turbidez, na cobertura verde os valores encontrados foram menores que 10 NTU e não apresentaram nenhuma relação com o primeiro fluxo do escoamento. Na cobertura de referência, os valores de turbidez foram maiores, porém diminuíram com o decorrer da chuva. Supõe-se que as partículas que são depositadas na superfície desta cobertura são transportadas pela precipitação no início do evento.

No fim da pesquisa, em consonância com os resultados do estudo de Gnecco *et al.* (2013), os autores concluíram que diferentemente da cobertura de referência, o primeiro fluxo não afeta a qualidade da água escoada pelas coberturas verdes. Comparando as duas coberturas, os resultados mostraram maior concentração de fósforo na cobertura verde, devido à utilização de fertilizantes para sua manutenção. A demanda química de oxigênio e a concentração de sulfato também foram mais elevadas nesta cobertura, contudo, os valores de turbidez e nitrogênio foram maiores na cobertura de referência. Isto mostra que cada cobertura apresenta uma influência distinta no controle qualitativo do escoamento da água.

Na Carolina do Norte, Hathaway, Hunt e Jennings (2008) avaliaram a concentração de nutrientes presentes no escoamento de uma cobertura verde extensiva, no escoamento de uma cobertura convencional e na água da chuva. Foram coletadas amostras em nove eventos de precipitação as quais foram analisadas em laboratório. Por meio de análise estatística utilizando o *test-t* os autores verificaram se houve diferença significativa entre as amostras. Os resultados mostraram que não houve melhora da qualidade da água escoada pelas coberturas verdes quando comparadas com a qualidade da água da chuva e da água escoada pelas coberturas de controle. A concentração de nitrogênio total na cobertura verde foi significativamente maior que a da água da chuva, porém, não diferiu significativamente da concentração da água escoada pela cobertura de controle. As concentrações de fósforo total na cobertura verde foram significativamente maiores do que as concentrações obtidas na cobertura convencional e na água da chuva. Como conclusão, o estudo indica que em locais onde a qualidade da água é um fator preocupante, a seleção ideal do solo é uma parte fundamental na montagem das coberturas verdes. A elevada concentração de nutrientes presentes no escoamento desta cobertura verde é devido à grande quantidade de matéria orgânica em seu substrato.

Em um estudo realizado em Yubei, na China, Zhang *et al.* (2015) analisaram a qualidade da água escoada por uma cobertura verde, por uma cobertura convencional e da água da chuva coletada diretamente da

atmosfera. Os resultados da qualidade da água foram comparados entre si por meio de métodos estatísticos não paramétricos (Kruskal-Wallis e Mann-Whitney). A cobertura verde mostrou-se como fonte de nutrientes, apresentando concentrações de nitrogênio total, nitrato e amônia significativamente maiores que as obtidas na água da chuva e na cobertura convencional. Apenas a concentração de fósforo foi semelhante nas duas coberturas em análise. Como observado em outros estudos, verificou-se que a cobertura verde elevou o valor do pH da água da chuva, contudo, este aumento não foi significativo. Como conclusão, os autores destacaram a importância da composição do substrato na qualidade da água escoada pelas coberturas verdes. As concentrações de nutrientes obtidas nesse trabalho foram significativamente mais elevadas que o usualmente reportado, indicando que o substrato utilizado foi fonte destes parâmetros. Como reportado por Hathaway, Hunt e Jennings (2008), a escolha do substrato ideal é fundamental quando se pretende melhorar a qualidade do escoamento pluvial.

Alguns estudos realizaram a comparação do escoamento gerado por diferentes configurações de cobertura verde, a fim de verificar a influência de suas características na qualidade da água escoada.

No estudo de Berndtsson, Bengtsson e Jinno (2009) a qualidade do escoamento gerado por uma cobertura verde intensiva, instalada no Japão, e uma cobertura verde extensiva, instalada na Suécia, foi avaliada. Foram monitorados quatro eventos de chuva na Suécia e cinco no Japão. Os resultados mostraram que as duas coberturas verdes conseguiram reter amônia, nitrato e nitrogênio total, sendo a retenção deste último mais evidente na cobertura intensiva, devido à maior absorção deste parâmetro pelas plantas de maior porte. Com relação à presença de fósforo, a cobertura verde extensiva mostrou-se fonte deste nutriente, principalmente na forma de fosfato. Em contraste, a cobertura verde intensiva não apresentou concentração destes parâmetros em seu escoamento. Esta diferença de comportamento pode ser explicada devido à fertilização em que a cobertura extensiva foi submetida em anos anteriores, e também a presença de fósforo em seu substrato. A quantidade de carbono orgânico dissolvido também foi maior na cobertura verde extensiva, devido seu substrato possuir 5% de matéria orgânica em sua composição. Com relação à presença de metais, ambas as coberturas apresentaram elevadas concentrações de potássio, com concentrações médias aproximadamente sete vezes maiores que a da água da chuva. Divergindo da cobertura extensiva, que apresentou concentração média de zinco superior a da água da chuva e nenhuma alteração na concentração de ferro, a cobertura verde intensiva funcionou

como um depósito destes elementos. Comparando os resultados com outros estudos, os autores concluíram que as concentrações de poluentes obtidas no escoamento das coberturas verdes analisadas foram iguais ou menores que as concentrações de poluentes encontradas no escoamento urbano. Contudo, não se pode afirmar que as coberturas verdes contribuíram para o tratamento da água da chuva. Também se percebeu que a configuração da cobertura verde, seus componentes e o tipo de manutenção afetam significativamente a qualidade da água escoada, mostrando a importância das técnicas e materiais utilizados para implantação deste tipo de cobertura.

No estudo de Vijayaraghavan, Joshi e Balasubramanian (2012), realizado em Singapura, analisou-se a qualidade da água escoada por coberturas semi-intensivas com diferentes materiais, sendo monitorados quatro eventos de chuva. Os resultados mostraram que em Singapura, a água da chuva mostrou-se fortemente ácida, com valores de pH entre 3,7 e 3,8, sendo que todas as coberturas analisadas foram capazes de neutralizar esta acidez. Em consonância com outros estudos, percebe-se que a passagem da água da chuva pelas coberturas contribui para diminuição de sua acidez. Comparando as coberturas verdes entre si, percebeu-se que as coberturas que utilizaram a camada de vegetação diminuíram as concentrações de nitrato e fosfato, porém, ainda assim elas foram maiores do que as concentrações obtidas na água escoada pela cobertura de concreto, mostrando que o substrato é uma fonte destes nutrientes. Os sistemas que utilizaram substrato local mostraram-se fonte de manganês, cálcio, potássio, sódio e cobre. A conclusão do trabalho mostra a importância da escolha dos materiais utilizados para composição da cobertura verde, principalmente quando um dos objetivos de sua implantação consiste na melhora da qualidade do escoamento pluvial.

Resultados similares foram encontrados no estudo de Harper *et al.* (2015), realizado em Missouri nos EUA, onde os autores analisaram coberturas verdes com diferentes tipos de substrato e também uma cobertura convencional, verificou-se que todos os parâmetros determinados (nitrogênio, fósforo, carbono em sua forma orgânica e total de sólidos suspensos) apresentaram concentrações maiores no escoamento das coberturas verdes. Os autores também montaram protótipos com e sem a camada de vegetação, sendo possível observar que a presença desta camada diminuiu a concentração de todos os parâmetros, com exceção do carbono em sua forma orgânica, onde não foi encontrada diferença significativa entre as coberturas vegetadas e não vegetadas. O tipo de substrato utilizado mostrou ter forte influência na concentração de cada parâmetro. O substrato com maior quantidade de

material fino e elevada concentração de fósforo apresentou os piores resultados.

Em Adelaide, na Austrália, Beecham e Razzaghmanesh (2015) analisaram a qualidade do escoamento gerado por diferentes tipos de coberturas verdes. Elas apresentaram diferenças no tipo e espessura do substrato (10 e 30 cm), presença ou não de vegetação e inclinação (1° e 25°). A água da chuva coletada diretamente da atmosfera também foi avaliada.

Em relação à turbidez, verificou-se que o escoamento das coberturas verdes com vegetação apresentou-se menos turvo, com valores médios no intervalo de 7,16 a 12,84. Para as coberturas não vegetadas os níveis de turbidez ficaram entre 13,04 e 30,90. Comparando-se com a água da chuva coletada diretamente da atmosfera, que apresentou média igual a 1,30, todos os tipos de cobertura analisados aumentaram a turbidez. Em dissonância com os outros estudos, a passagem da água pelas coberturas verdes aumentou a acidez da água. A água da chuva apresentou pH médio igual a 7,50, enquanto as coberturas verdes apresentaram pH médio no intervalo de 5,65 a 6,98. O único fator que ocasionou diferença significativa nos valores de pH foi a presença de vegetação, sendo menor nas coberturas não vegetadas. Quanto à presença de nutrientes, o nitrogênio foi avaliado em forma de nitrito, nitrato e amônia. A concentração dos mesmos na água coletada da atmosfera foi próxima ou igual a zero. Com relação às coberturas vegetadas, observou-se que elas apresentaram níveis de nitrito entre 0,48 e 0,99 mg/L e níveis de nitrato próximos a zero, não alterando significativamente a qualidade da água da chuva. Contudo, estas coberturas mostraram-se como fonte de amônia, elevando a concentração deste nutriente no escoamento pluvial.

Como conclusão, verificou-se que a presença da vegetação foi o principal fator que contribuiu para melhora da qualidade da água escoada pelas coberturas verdes. Isto se justifica devido à absorção de poluentes pelas plantas. Os autores também observaram que o tipo de substrato possui influência significativa, sendo que os resultados indicaram que quanto maior a quantidade de matéria orgânica menor é a qualidade da água escoada.

Entre âmbito nacional, alguns trabalhos foram realizados a fim de avaliar a qualidade da água escoada por coberturas verdes. Destaca-se o trabalho realizado por Teixeira (2013), onde foram analisadas oito configurações distintas deste tipo de sistema e também de uma cobertura convencional, para comparação de resultados. No decorrer do estudo, foram coletadas sete amostras de cada protótipo, as quais foram analisadas laboratorialmente. Duas coletas ocorreram em abril de 2011, e



as demais em janeiro e fevereiro de 2012. A comparação de resultados foi realizada por meio do método estatístico de Mann-Whitney.

Os resultados mostraram que a passagem pelas coberturas analisadas conferiu cor à água da chuva, principalmente nas coberturas verdes. Com relação à turbidez, apenas uma das coberturas (extensiva com 10 centímetros de substrato) apresentou resultados significativamente superiores aos da cobertura convencional, devido à maior lixiviação das partículas do solo desta cobertura. Também verificou-se que, com o passar do tempo, os valores de turbidez dos protótipos diminuíram, sendo menores que 2 NTU nas últimas amostras coletadas. Como na maior parte dos estudos revisados, a passagem da água pelas coberturas aumentou seu pH, sendo que todos os valores obtidos nas coberturas verdes foram maiores que 7. Os valores de fósforo total obtidos para as coberturas verdes foram significativamente maiores do que os encontrados na cobertura convencional, provavelmente, devido ao carregamento deste composto pelo substrato e vegetação. Com relação à presença de nitrogênio, suas concentrações nas coberturas verdes apresentaram valores considerados baixos e semelhantes à cobertura convencional, no intervalo de 1 a 4 mg/L. Após a análise dos parâmetros microbiológicos, percebeu-se que houve aumento da presença de coliformes totais após a passagem da água pelas coberturas. Em uma das coletas, a água coletada diretamente da atmosfera apresentou contagem de coliformes totais igual a  $1,7 \times 10^3$  NMP/100 mL enquanto nas coberturas analisadas, este número foi maior que  $2,4 \times 10^3$  NMP/100 mL. Foi visto ainda que os teores de metais foram insignificantes no escoamento das coberturas verdes. No fim do estudo constatou-se uma melhora na qualidade da água drenada pelas coberturas verdes com o passar do tempo. Com relação às diferentes combinações de tipos e espessura do substrato, tipo de vegetação, manta geotêxtil e tipo de sistema, os resultados das análises laboratoriais de cada configuração indicaram pouca diferença quando comparados entre si.

Na cidade de Caruaru-PE, localizada na região nordeste do Brasil, Farias (2012) analisou os aspectos qualitativos da água drenada por três superfícies de captação: uma cobertura convencional com telhas cerâmicas e duas coberturas verdes, sendo uma com vegetação do tipo coroa-de-frade e outra com vegetação do tipo grama-de-burro. Foram analisados doze eventos de precipitação durante os meses de janeiro a agosto de 2012. As concentrações de alguns dos parâmetros avaliados no estudo estão apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Concentrações mínimas e máximas de alguns parâmetros analisados no estudo de Farias (2012).**

Parâmetro	Cobertura verde com grama-de-burro		Cobertura verde com coroa-de-frade		Cobertura com telha cerâmica	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Cor aparente (uC)	72,0	750,0	142,0	1208,0	1,0	30,0
Oxigênio dissolvido (mg/L)	2,0	9,6	2,1	8,6	1,2	11,9
Turbidez (uT)	7,00	16,85	1,00	25,70	0,60	13,68
pH	6,40	7,90	6,60	7,65	5,30	7,20
Ferro (mg/L)	0,10	1,82	0,40	2,47	0,00	0,07
Nitrito (mg/L)	0,05	0,85	0,04	1,48	0,01	0,26
Nitrato (mg/L)	0,85	112,47	0,00	80,14	0,00	17,26
Amônia (mg/L)	0,00	7,22	0,00	9,25	0,00	2,84

Fonte: Adaptado de Farias (2012).

Os resultados demonstram que a passagem da água pelas coberturas verdes altera fortemente a coloração da água e seus níveis de turbidez, indicando que houve elevado carregamento de partículas do solo no escoamento. Os parâmetros referentes ao nitrato e ao fosfato também apresentaram alteração significativa. A autora justifica isto devido ao substrato utilizado e a presença de matéria orgânica, cuja origem é a decomposição da vegetação das coberturas verdes. Nesse estudo também se constatou a influência do tipo de vegetação utilizada, visto que a cobertura verde com coroa-de-frade apresentou os piores resultados. A principal razão para isto ocorrer decorre da morfologia da raiz desta planta, a qual possibilita maior arraste de partículas de solo.

No estudo de Castro (2011), realizado na cidade de Porto Alegre-RS, a autora avaliou a qualidade do escoamento gerado por duas coberturas verdes modulares, uma instalada de maneira plana, sem nenhuma inclinação, e outra com inclinação de 15°. A água drenada por uma cobertura convencional também foi caracterizada para comparação de resultados.

Após a análise da água em nove eventos de precipitação, entre maio de 2008 e janeiro de 2009, constatou-se que as coberturas verdes

atuaram como fonte de alguns compostos de nitrogênio (nitrogênio total e nitrato), compostos de fósforo (fósforo total e ortofosfato) e sólidos totais. Destaca-se que as concentrações dos compostos de fósforo foram dez vezes mais elevadas nas coberturas verdes. A autora associa isto à grande quantidade de nutrientes no substrato utilizado. Além disso, as amostras coletadas nestes sistemas apresentaram coloração forte, com cor aparente média igual a 198,0 uC para cobertura verde inclinada e 146,2 uC para cobertura verde plana. Com relação à amônia, à turbidez e à presença de metais verificou-se que não houve diferença significativa entre a água escoada pelas coberturas verdes e a água escoada pela cobertura convencional. Observou-se que a inclinação da cobertura verde não foi um fator determinante para causar diferenças significativas nas características físico-químicas das águas escoadas pelos dois sistemas analisados.

Em Curitiba, Budel (2014) analisou a qualidade da água da chuva coletada por dois sistemas distintos de captação: um composto por um telhado inclinado com telhas de concreto (sistema 1) e outro composto por uma cobertura plana com cobertura verde (sistema 2). Durante o período de monitoramento, que compreendeu os meses entre maio e dezembro de 2013, foram coletadas amostras em nove eventos de precipitação. No sistema 1, a coleta ocorreu na torneira externa, para caracterizar a água captada e utilizada pelos moradores. No sistema 2 foram coletadas amostras em dois pontos distintos, na cisterna de armazenamento e no reservatório superior (após passagem por dois filtros).

Os resultados obtidos mostraram que os maiores valores de turbidez ocorreram nas amostras coletadas na cisterna da cobertura verde, sendo que as águas apresentaram-se mais turvas em eventos com maior volume de precipitação. A cobertura convencional mostrou-se eficiente, apresentando os menores valores medidos. As duas coberturas foram capazes de neutralizar o pH da água da chuva, principalmente a cobertura verde que apresentou valores de pH entre 7 e 8. Com relação às diversas formas do nitrogênio, as amostras coletadas não apresentaram concentrações significativas de amônia, nitrito e nitrato. A amônia e o nitrito apresentaram concentrações mais elevadas no escoamento da cobertura verde no último evento, devido à manutenção que foi realizada alguns dias antes à coleta. A água da chuva apresentou as maiores concentrações de amônia. A maior parte das amostras apresentou ausência de nitrato, sendo que houve maior frequência no escoamento da cobertura verde. Quanto ao fosfato, observou-se concentrações consideráveis em todos os eventos, sendo os maiores valores obtidos na

água escoada pela cobertura verde e armazenada na cisterna. Isto ocorre devido à liberação deste parâmetro pelo substrato. Por meio da análise microbiológica, verificou-se um predomínio de resultados elevados para presença de coliformes totais e termotolerantes no escoamento da cobertura verde, principalmente na amostra coletada na cisterna. O estudo concluiu que ambos os telhados necessitam de tratamento para permitir o reaproveitamento da água da chuva, sendo que os dois apresentaram níveis de qualidade semelhantes.

Em Santa Maria, Pessoa (2016) analisou a qualidade da água escoada por uma cobertura convencional de fibrocimento e por duas coberturas verdes modulares, uma instalada no ano de 2010 e outra no ano de 2013. Além do tempo de instalação, as coberturas verdes apresentam diferenças com relação ao tipo de módulo e tipo de vegetação utilizada. A comparação de resultados entre os diferentes sistemas foi realizada por meio da aplicação de métodos estatísticos (*teste-t*, Mann-Whitney e Shapiro-Wilk). A Tabela 6 apresenta os resultados de alguns parâmetros reportados nesse estudo. Denominou-se como cobertura verde 1 e cobertura verde 2 os sistemas instalados em 2010 e 2013, respectivamente.

Em geral, o autor verificou que as coberturas verdes atuaram como fonte de cloretos, condutividade elétrica, cor, demanda bioquímica de oxigênio, fosfato, dureza total, coliformes totais, sulfato e turbidez. Destaca-se que os valores de turbidez e fosfato apresentaram diferenças significativas entre as duas coberturas verdes. Isto foi justificado devido às diferentes características do substrato e ao tempo de instalação. Observou-se que a cobertura verde mais antiga apresentou melhores resultados, sugerindo que com o passar do tempo ocorre maior estabilização do sistema e com isso menor lixiviação de sólidos e parâmetros químicos que alteram a qualidade da água.

Com relação à presença de nitrito, nitrato, nitrogênio NTK e ferro não houve aumento significativo da concentração destes parâmetros no escoamento das coberturas verdes. Como nos outros estudos, verificou-se que a passagem da água da chuva pelas coberturas verdes converteu seu caráter ligeiramente ácido para o básico, aumentando o valor do pH. Outro efeito importante observado nesta pesquisa refere-se à influência da sazonalidade. No verão, as concentrações de nitrito e nitrato apresentaram-se mais elevadas em relação às demais épocas do ano. Como conclusão, verificou-se que a qualidade da água escoada pelas coberturas verdes e pela cobertura convencional apresenta potencial para usos não potáveis, contudo, para determinados usos é necessário realizar um tratamento prévio da água escoada.

**Tabela 6 – Concentrações médias, mínimas e máximas de alguns parâmetros analisados no estudo de Pessoa (2016).**

Parâmetro	Cobertura verde 1			Cobertura verde 2		
	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média
Cor aparente (uC)	233,9	458,4	316,7	178,8	403,3	274,6
Turbidez (uT)	0,1	11,0	2,5	1,2	13,5	7,2
pH	7,1	7,9	7,7	6,5	7,7	7,3
Ferro (mg/L)	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Fosfato (mg/L)	0,7	1,6	1,2	4,7	7,1	5,9
Nitrato (mg/L)	0,2	1,1	0,5	0,3	18,7	3,4
Nitrito (mg/L)	<0,05	0,1	-	<0,05	2,2	-
Parâmetro	Fibrocimento			Água da chuva		
	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média
Cor aparente (uC)	40,7	317,6	110,9	0,0	31,9	7,6
Turbidez (uT)	0,7	8,7	2,7	0,0	5,3	1,2
pH	6,8	7,4	7,2	4,5	6,9	5,6
Ferro (mg/L)	<0,006	0,0	-	<0,006	0,0	-
Fosfato (mg/L)	<0,1	0,8	-	<0,1	<0,1	-
Nitrato (mg/L)	0,0	1,5	0,5	0,3	2,2	0,9
Nitrito (mg/L)	<0,05	0,1	-	<0,05	0,2	-

Fonte: Adaptado de Pessoa (2016).

Grande parte das pesquisas sobre a qualidade da água escoada por coberturas verdes indicam que elas atuam como fonte de poluentes. Porém, alguns estudos revisados sugerem uma melhoria na qualidade da água após a passagem por este tipo de cobertura.

Gregoire e Clausen (2011) analisaram a qualidade do escoamento gerado por uma cobertura verde modular, com área de 248m<sup>2</sup>, instalada sobre o piso de uma praça localizada na cobertura de um edifício, em Connecticut, nos EUA. No período de instalação adicionou-se fertilizante de liberação lenta nos módulos de cobertura verde. Os autores também avaliaram a água da chuva coletada diretamente da atmosfera e o

escoamento de uma cobertura de referência, feita de concreto e com área de 178m<sup>2</sup>. A Tabela 7 apresenta as concentrações médias de alguns parâmetros determinados.

**Tabela 7 - Resultados de qualidade da água obtidos no estudo de Gregoire e Clausen (2011).**

<b>Parâmetro</b>	<b>Água da chuva</b>	<b>Cobertura convencional</b>	<b>Cobertura verde</b>
Nitrogênio total (mg/l)	0,510	0,896	0,490
Amônia (mg/l)	0,101	0,019	0,023
Fósforo total (mg/l)	0,007	0,197	0,043
Zinco (mg/l)	0,029	0,060	0,011
Cobre (mg/l)	-	-	0,006

Fonte: Adaptado de Gregoire e Clausen (2011).

No fim do estudo, os autores concluíram que a cobertura verde analisada atuou positivamente na redução dos poluentes presentes na água da chuva, sendo capaz de reter amônia, zinco e nitrogênio. Com relação ao cobre e ao fósforo, houve liberação destes parâmetros pela cobertura verde devido à sua presença no fertilizante utilizado. As concentrações de nutrientes da cobertura verde obtidas nesta pesquisa foram menores que as obtidas por outros autores. Isto se deve ao tipo de fertilizante utilizado, que possui liberação lenta, resultando em menor liberação de nitrogênio e fósforo no escoamento. O substrato utilizado, que possui uma porcentagem de xisto em sua composição, também se mostrou eficaz na absorção de poluentes.

Um estudo semelhante foi realizado na Estônia, por Teemusk e Mander (2007). Os autores realizaram a análise da qualidade da água escoada por duas coberturas distintas, uma convencional feita de betume e uma cobertura verde, em dois eventos de precipitação, um moderado e outro forte. Em consonância com outros estudos, o valor do pH aumentou após a passagem da água pelas coberturas, principalmente nas coberturas verdes nos eventos intensos. Com relação à presença de nutrientes, as maiores concentrações de fósforo total foram observadas no escoamento da cobertura de referência, devido ao acúmulo de poeira e outros poluentes em sua superfície. A cobertura verde apresentou grandes quantidades de sulfato, devido à presença deste íon na composição do substrato utilizado.

Como conclusão, os autores identificaram que o escoamento gerado pela cobertura verde apresentou qualidade superior ao escoamento da cobertura de referência. Comparando com outros estudos, observaram-se menores concentrações de nitrogênio total e fósforo total no escoamento da cobertura verde analisada. Isto pode ser explicado devido o substrato utilizado não apresentar adição de composto e a cobertura não apresentar adição de fertilizantes. Deste modo, destaca-se a importância da escolha ideal da composição do substrato e do tipo de manutenção utilizada.

No estudo de Köhler *et al.* (2002), os autores basearam-se em dados de uma cobertura verde instalada em Berlim e mostraram que ela foi capaz de reter 94,7% de chumbo, 87,6% de cádmio, 80,2% de nitrato e 67,5% de fosfato. Os resultados foram obtidos após três anos de monitoramento. Nesta pesquisa também observou-se que a retenção de fosfato aumentou com o tempo, devido ao estabelecimento da vegetação e à maior absorção deste nutriente pelas raízes. Durante quatro anos consecutivos de monitoramento a retenção de fosfato pela cobertura verde passou de 26,1% no primeiro ano para 79,9% no último ano.

O método empregado nos estudos revisados consiste na coleta e análise laboratorial de amostras do escoamento gerado por protótipos de cobertura verde ou por edificações que utilizem esta técnica. A maior parte das coletas foi realizada utilizando garrafas plásticas ou de vidro, sendo que as amostras foram analisadas em seguida a coleta ou preservadas em refrigerador até o momento da análise (TEEMUSK; MANDER, 2007; VIJAYARAGHAVAN; JOSHI; BALASUBRAMANIAN, 2012; TEIXEIRA, 2013). Os indicadores de qualidade a serem determinados dependem do objetivo de cada pesquisa. Para verificar se as coberturas verdes atuam como fonte de poluentes ou se são capazes de retê-los, a qualidade da água da chuva coletada diretamente da atmosfera também é analisada. Na literatura, observou-se que os testes frequentemente utilizados para comparação de resultados são o *test-t*, Mann-Whitney e Kruskal-Wallis (GNECCO *et al.*, 2013; TEIXEIRA, 2013; (HATHAWAY; HUNT; JENNINGS, 2008; ZHANG *et al.*, 2015; PESSOA, 2016).

## 2.5 APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL

A utilização de água da chuva em locais onde a potabilidade não é requerida, é uma técnica atraente ecologicamente, visto que reduz a quantidade de água potável consumida na edificação. No Brasil, alguns

municípios possuem legislações que preveem a adoção de técnicas que promovam a conservação da água.

Em Curitiba, a lei nº 10.785 de 18 de setembro de 2003 instituiu o PURAE - Programa de Conservação e Uso Racional de Água em Edificações, que tem por objetivos estabelecer medidas que promovam o uso racional e a adoção de fontes alternativas de abastecimento de água nas novas edificações. Entre as recomendações destaca-se o uso de aparelhos e dispositivos economizadores de água e a captação, armazenamento e utilização de água de chuva e de águas servidas (CURITIBA, 2003). A partir de 2007, o Decreto Municipal nº 212 de 29 de março de 2007 estabeleceu o novo Regulamento de Edificações do Município de Curitiba, estipulando que os projetos submetidos à aprovação do órgão municipal devem atender as exigências do PURAE (CURITIBA, 2007).

A lei nº 12.526, de 2 de janeiro de 2007, torna obrigatório no estado de São Paulo, como condição para a obtenção das aprovações e licenças, a implantação de sistema para a captação e retenção de águas pluviais em lotes edificados ou não, que possuam área impermeabilizada superior a 500m<sup>2</sup>. A água captada deve ser infiltrada no solo, ser lançada na rede pública de drenagem, após uma hora do início da chuva, ou, ser utilizada para usos não potáveis (SÃO PAULO, 2007).

No município de Goiânia, a lei nº 9.511, de 15 de dezembro de 2014, estabelece normas para controle e captação de água pluvial com o objetivo de estimular a adoção de estruturas de drenagem alternativas ou compensatórias que promovam a retenção e infiltração das águas superficiais, bem como sua disposição para o reuso. Esta lei se aplica à loteamentos e à ocupação do solo para atividades residenciais e não residenciais que causem a impermeabilização do solo ou aumento à contribuição de água ao sistema de drenagem urbana (GOIÂNIA, 2014).

A promulgação de instrumentos legais é uma maneira de difundir a adoção de técnicas que promovam a conservação de água. Contudo, destaca-se que nos casos em que a água da chuva for destinada para usos não potáveis, é necessário analisar sua qualidade, a fim de evitar possíveis problemas devido à presença de poluentes tóxicos ou contaminantes microbiológicos que possam afetar a saúde dos usuários.

### **2.5.1 Parâmetros de qualidade da água**

Segundo Von Sperling (1995), a determinação da qualidade da água pode ser feita por meio da análise de suas características físicas,



químicas e biológicas, sendo que os principais parâmetros a serem determinados correspondem aos seguintes:

- Parâmetros físicos: cor, turbidez e temperatura;
- Parâmetros químicos: pH, ferro, nitrogênio e suas formas, fósforo e suas formas, oxigênio dissolvido, matéria orgânica e micropoluentes inorgânicos e orgânicos;
- Parâmetros microbiológicos: organismos patogênicos e organismos indicadores de contaminação fecal.

O pH corresponde ao potencial hidrogeniônico e representa a concentração de íons de hidrogênio ( $H^+$ ). A faixa de pH varia de 0 a 14 e seu valor indica a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água (VON SPERLING, 1995).

A cor é responsável pela coloração na água e está associada à presença de sólidos dissolvidos, originados principalmente pela decomposição da matéria orgânica e inorgânica (VON SPERLING, 1995). Este parâmetro não representa risco direto à saúde, sendo sua maior influência o fator estético, que pode causar rejeição por parte dos usuários (CETESB, 2009).

A turbidez representa o grau de interferência gerado em um feixe de luz quando o mesmo passa pela água. Isto ocorre devido à presença de sólidos em suspensão, como partículas inorgânicas de rocha, argila e silte ou detritos orgânicos, como algas e outros microorganismos. O fenômeno da erosão também aumenta a turbidez da água. Águas turvas causam rejeição do usuário e podem prejudicar a fotossíntese em corpos d'água devido à redução da penetração de luz (VON SPERLING, 1995).

As bactérias do grupo coliforme são comumente utilizadas como indicadores de contaminação fecal. Os coliformes totais estão associados a fezes de animais de sangue quente e águas com altos teores de matéria orgânica. Os coliformes termotolerantes são representados principalmente pela bactéria *Escherichia Coli*, a qual possui origem exclusivamente fecal (CETESB, 2009). Os resultados destes parâmetros são expressos em número mais provável de coliformes em 100 ml de água (NMP/100 ml).

O nitrogênio pode ser encontrado na água em forma de nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. A presença destes parâmetros pode ser de origem natural, por ser constituinte de proteínas e clorofila, bem como de origem antropogênica, devido a despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e fertilizantes (VON SPERLING, 1995). De acordo com Alaburda e Nishira (1998), a concentração de amônia em águas superficiais ou subterrâneas pode apresentar-se baixa devido a este

composto ser facilmente absorvido por partículas do solo ou por sofrer processo de oxidação, onde transforma-se em nitrato ou nitrato.

A presença de fósforo é associada à dissolução de compostos do solo, à decomposição da matéria orgânica, ao excremento de animais, aos despejos domésticos e industriais e ao uso de fertilizantes (VON SPERLING, 1995). Elevadas concentrações destes componentes em lagos e represas pode ocasionar o fenômeno de eutrofização (CETESB, 2009).

A concentração de oxigênio dissolvido é o principal parâmetro para caracterização da poluição da água devido à presença de matéria orgânica. As bactérias utilizam oxigênio nos seus processos aeróbios durante a estabilização da matéria orgânica. A falta de oxigênio dissolvido provoca a geração de mau odor nas águas (VON SPERLING, 1995). De acordo com Fiorucci e Benedetti (2005), este parâmetro é influenciado fortemente pela temperatura. Isto ocorre devido à solubilidade dos gases em água decrescerem com o aumento da temperatura. Deste modo, quanto maior a temperatura, menor será a quantidade de oxigênio dissolvido.

### **2.5.2 Documentos de referência para análise da qualidade da água não potável**

Mesmo nos casos em que o uso da água se destina a locais onde a potabilidade não é exigida, ela deve possuir qualidade que não cause rejeição do usuário e, se caso ocorrer o consumo acidental, não acarrete riscos à saúde de quem a ingeriu. Deste modo, a fim de garantir a saúde dos usuários que utilizam sistemas de aproveitamento de água, é necessária a avaliação da qualidade da água utilizada a fim de verificar se a mesma atende aos padrões mínimos de qualidade impostos por documentos de referência. No Brasil existem diferentes legislações que especificam limites a serem seguidos, os quais dependem do uso final a que a água será destinada.

A resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água de acordo com a qualidade requerida para seus usos preponderantes. As águas doces, que possuem salinidade inferior a 0,5‰, são classificadas em cinco classes, sendo (BRASIL, 2005):

- a) Classe especial: águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano com desinfecção, à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e à preservação dos

ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral;

- b) Classe 1: águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação de hortaliças de frutas e à proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas;
- c) Classe 2: águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação e à aquicultura e à atividade de pesca;
- d) Classe 3: águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado, à irrigação de culturas arbóreas, à pesca, à recreação de contato secundário e à dessedentação de animais;
- e) Classe 4: águas que podem ser destinadas à navegação e à harmonia paisagística.

Por sua vez, um dos objetivos da NBR 13.969 consiste em oferecer alternativas para disposição final dos efluentes líquidos de tanque séptico (ABNT, 1997). Deste modo, esta norma define padrões de qualidade a serem seguidos de acordo com o uso em que a água será destinada. Assim, as águas podem ser classificadas nas classes 1, 2, 3 e 4, com seus respectivos valores de parâmetros a serem seguidos, conforme apresentado a seguir:

- a) Classe 1: Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água - turbidez inferior a 5 NTU, coliforme fecal inferior a 200 NMP/100 mL, sólidos dissolvidos totais inferior a 200 mg/L, pH entre 6,0 e 8,0 e cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L;
- b) Classe 2: limpeza de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos - turbidez inferior a 5 NTU, coliforme fecal inferior a 500 NMP/100 mL e cloro residual superior a 0,5 mg/L;
- c) Classe 3: reuso nas descargas dos vasos sanitários - turbidez inferior a 10 NTU e coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100 mL;
- d) Classe 4: reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual - coliforme fecal inferior a 5000 NMP/100 mL e oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L.

Do mesmo modo, a publicação “Conservação e Reuso da Água em Edificações” também estabelece requisitos de qualidade a serem cumpridos de acordo com o uso a que a água se destina, sendo as quatro classes descritas a seguir (ANA; FIESP; SindusCon-SP, 2005):

- a) Classe 1: descarga de bacias sanitárias, fins ornamentais, lavagem de pisos, roupas e veículos;
- b) Classe 2: os usos preponderantes nessa classe são associados às fases de construção da edificação;
- c) Classe 3: irrigação de áreas verdes e rega de jardins;
- d) Classe 4: resfriamento de equipamentos de ar-condicionado.

A NBR 15.527 (ABNT, 2007) dispõe sobre os requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis. A água coletada pode ser utilizada em descargas de bacias sanitárias, lavagem de veículos, limpezas de pisos e calçadas, uso industrial e irrigação de gramados e plantas ornamentais. Esta norma apresenta alguns requisitos de qualidade da água para fins de aproveitamento, os quais são apresentados na Tabela 8.

Por fim, nos casos em que a água coletada for utilizada para irrigação, é possível consultar a documentação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que define limites de concentrações para alguns parâmetros necessários para avaliação da qualidade da água para irrigação (ALMEIDA, 2010).

**Tabela 8 - Parâmetros para qualidade da água para fins não potáveis.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Análise</b>	<b>Valor admissível</b>
Coliformes totais	NMP/ 100mL	Semestral	Ausência em 100 mL
Coliformes termotolerantes	NMP/ 100mL	Semestral	Ausência em 100 mL
Cloro residual livre	mg/L	Mensal	0,5 a 3,0 mg/L
Cor aparente	uH	Mensal	< 15 Uh
pH	-	Mensal	6 a 8
Turbidez	uT	Mensal	<2,0 uT para usos menos restritivos < 5,0 uT

Fonte: Adaptado de ABNT (2007).

### 2.5.3 Algoritmo do programa Netuno

O programa computacional Netuno é utilizado para realizar simulações de sistemas de captação de água da chuva. O método que o programa utiliza é baseado em modelos comportamentais e para isso variáveis conhecidas são inseridas como dados de entrada para realizar a simulação. Elas correspondem aos dados diários de precipitação, ao volume do descarte da precipitação inicial, à área de captação, à demanda total de água, ao número de moradores da edificação, à demanda diária de água per capita, ao percentual de demanda total que pode ser substituída por água de chuva, ao coeficiente de escoamento superficial e às informações referentes ao volume do reservatório superior e inferior (GHISI; CORDOVA, 2014).

A partir destes dados é possível simular o potencial de economia de água potável adquirido em função do volume do reservatório. Por meio de um gráfico que relaciona estas duas variáveis, o usuário consegue escolher adequadamente um reservatório que atenda a demanda de água da chuva da residência, e que ao mesmo tempo, seja viável economicamente. Ainda, tem-se disponível uma opção em que o Netuno define um volume ideal para o reservatório inferior. Para isso, o usuário deve definir uma diferença mínima de potencial de economia entre dois reservatórios adjacentes. O reservatório ideal é aquele cujo um incremento em sua capacidade gere uma diferença de potencial de economia menor ou igual ao valor definido pelo usuário (GHISI; CORDOVA, 2014).

As simulações são realizadas em base diária, calculando-se o balanço de massa a cada dia, conforme a demanda e disponibilidade de água pluvial. A água que esco na superfície de captação, descontando-se as perdas iniciais e o descarte do escoamento inicial, é conduzida ao reservatório. Caso a demanda de água pluvial seja menor que o volume captado, a demanda é completamente atendida e o excesso de água é extravasado. Por outro lado, quando a demanda de água pluvial é maior que o volume captado, a demanda é atendida parcialmente, e é necessário complementar o atendimento com água potável fornecida pela concessionária. A sequência de cálculos utilizada pelo algoritmo é descrita a seguir (GHISI; CORDOVA, 2014).

O volume de água pluvial que esco pela superfície de captação diariamente é obtido por meio da Equação 1.

$$V_E^i = P_i \cdot A \cdot C \quad (1)$$

Onde:

$V_E^i$  é o volume de água que escoar pela superfície de captação no dia “i” (L);

$P_i$  é a precipitação pluviométrica diária (mm/dia);

$A$  é a área de captação (m<sup>2</sup>);

$C$  é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional).

Em seguida, calcula-se o volume armazenado no reservatório antes do consumo diário e o volume de água pluvial consumido diariamente por meio das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$V_I^i = \min \left\{ \frac{V_r}{V_F^{i-1} + V_E^i} \right\} \quad (2)$$

Onde:

$V_I^i$  é o volume disponível no reservatório no início do dia “i” (L);

$V_r$  é o volume do reservatório (L);

$V_I^{i-1}$  é o volume disponível no reservatório no final do dia anterior “i-1” (L);

$V_E^i$  é o volume de água que escoar pela superfície de captação no dia “i” (L).

$$V_C^i = \min \left\{ \frac{D_p^i}{V_I^i} \right\} \quad (3)$$

Onde:

$V_C^i$  é o volume de água consumido no dia “i” (L);

$D_p^i$  é a demanda de água pluvial no dia “i” (L);

$V_I^i$  é o volume disponível no reservatório no início do dia “i” (L).

Deste modo, após o consumo diário, o volume de água pluvial disponível no reservatório no fim do dia “i” é determinado por meio da Equação 4.

$$V_F^i = \min \left\{ \frac{V_I^i - V_C^i}{V_r - V_C^i} \right\} \quad (4)$$

Onde:

$V_F^i$  é o volume de água pluvial disponível no reservatório ao final do dia “i” (L);

$V_I^i$  é o volume disponível no reservatório no início do dia “i” (L);

$V_C^i$  é o volume de água consumido no dia “i” (L);

$V_r$  é o volume do reservatório (L).

Por fim, o potencial de economia de água potável que pode ser obtido com o sistema de aproveitamento de água pluvial é determinado por meio da Equação 5.

$$P_{ec} = 100 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{V_C^i}{n \cdot D_t^i} \quad (5)$$

Onde:

$P_{ec}$  é o potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento da água pluvial (%);

$V_C^i$  é o volume de água pluvial consumido no dia  $i$  (L);

$n$  é o número de moradores;

$D_t^i$  é a demanda de água potável por habitante no dia “ $i$ ” (L).

## 2.6 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura realizada neste capítulo descreveu brevemente as características e os benefícios das coberturas verdes. O foco principal, e que orientou a definição de parâmetros a serem analisados nesta pesquisa, consistiu na análise de estudos que avaliaram o comportamento das coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento pluvial.

Com a revisão de literatura referente ao desempenho das coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento pluvial, pode-se concluir que além da configuração da cobertura verde utilizada, as características do evento pluviométrico e a condição de umidade antecedente do solo são fatores que influenciam o desempenho hidrológico de cada sistema. Nos estudos revisados, verificou-se que a altura pluviométrica é uma variável que possui forte influência na capacidade de retenção da cobertura verde, sendo que quanto maior o volume precipitado, maior o escoamento superficial gerado (CARTER; RASMUSSEN, 2006; TEEMUSK; MANDER, 2007; GETTER; ROWE; ANDRESEN, 2007; LEE *et al.*, 2013; WONG; JIM, 2014; LEE; LEE; HAN, 2015; ROSSATO *et al.*, 2015, ZHANG *et al.*, 2015). Além disto, quantidade de água presente no sistema antes de cada evento chuvoso também é determinante na capacidade de retenção alcançada (CARTER; RASMUSSEN, 2006; TEEMUSK; MANDER, 2007; GETTER; ROWE; ANDRESEN, 2007; LEE *et al.*, 2013; TASSI *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2015; PESSOA, 2016), sendo que pode até mesmo mitigar o efeito da

variação de outros componentes da cobertura verde. Como visto no estudo de Wong e Jim (2014), a variação da altura do substrato mostrou-se um fator de pouca relevância no aumento da capacidade de retenção de água devido aos elevados níveis de umidade do sistema. Deste modo, percebe-se que uma série de variáveis pode influenciar o desempenho das coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento, sendo uma atividade complexa prever seu comportamento sem a realização de monitoramento.

Dentre os estudos revisados, o potencial de retenção do escoamento pluvial das coberturas verdes mostrou-se variado, como pode ser visto na Tabela 9, que apresenta os valores de retenção máxima, mínima e média obtido por diferentes autores. As diferentes configurações utilizadas e as características climáticas distintas de cada pesquisa impossibilitam a comparação direta dos resultados. Porém, percebeu-se que todas as coberturas verdes pesquisadas apresentaram bom desempenho hidrológico no controle quantitativo do escoamento, principalmente em eventos de chuva leve e moderada.

**Tabela 9 - Variação do potencial de retenção em diferentes estudos.**

Autores	Inclinação	Espessura do substrato (cm)	Retenção (%)		
			Mín.	Máx.	Méd.
Villarreal e Bengtsson (2005)	2°	4,0	21,00	62,00	46,00
Carter e Rasmussen (2006)	2°	7,62	39,00	100,00	78,00
Teemusk e Mander (2007)	0°	10,0	2,00	93,70	60,00
Getter, Rowe e Andresen (2007)	2°	6,0	71,40	93,30	85,20
Tassi <i>et al.</i> (2014)	1°	8,0	0,00	100,00	62,00
Wong e Jim (2014)	2°	4,0	0,40	100,00	38,90
	2°	8,0	0,90	100,00	45,30
Lee, Lee e Han (2015)	-	15,0	13,80	34,40	27,00
	-	20,0	42,80	60,80	49,00
Zhang <i>et al.</i> (2015)	-	15,0	35,50	100,00	77,20

Por meio da revisão de literatura referente ao desempenho das coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento pluvial,



percebeu-se que elas podem agir como fonte de alguns poluentes, bem como ocasionar a retenção de outros. Nos estudos revisados, verificou-se que a composição do substrato possui influência significativa na liberação ou retenção de nutrientes (GREGOIRE; CLAUSEN, 2011; HARPER *et al.*, 2015). Solos com maior quantidade de matéria orgânica liberam maior quantidade de compostos de nitrogênio e fósforo (HATHAWAY; HUNT; JENNINGS, 2008; BERNDTSSON; BENGTSSON; JINNO, 2009; ZHANG *et al.*, 2015). A idade, estação do ano, o sistema de cobertura verde utilizado, o tipo de manutenção e o volume precipitado também apresentaram influência na qualidade da água escoada. O uso de fertilizantes mostrou-se prejudicial no controle qualitativo do escoamento, devido à elevada liberação de nutrientes que eles ocasionam, principalmente de fósforo e fosfato (BERNDTSSON; EMILSSON; BENGTSSON, 2006; BLISS; NEUFELD; RIES, 2009; ZHANG *et al.*, 2015). Nas situações em que há necessidade de sua aplicação, deve-se optar por fertilizantes de liberação lenta (GREGOIRE; CLAUSEN, 2011). A principal vantagem das coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento refere-se ao seu potencial de neutralizar a água da chuva. Com relação à presença de metais, as coberturas verdes apresentaram menor influência na liberação destes parâmetros. Grande parte dos estudos indicou concentrações similares entre o escoamento da cobertura verde e a água da chuva.

Os estudos indicaram que a cobertura verde não pode ser considerada como uma técnica que promove o tratamento da água, contudo, as superfícies geralmente utilizadas para captação de água da chuva (telhado convencional) também não podem. Deste modo, é importante para saúde e satisfação do usuário realizar a análise da água coletada, a fim de verificar se seus parâmetros físicos, químicos e microbiológicos atendem os limites impostos para seu uso. Se as questões referentes à qualidade da água escoada pelas coberturas verdes forem consideradas na fase de projeto, é possível obter coberturas verdes que contribuam para melhora da qualidade do escoamento pluvial. Deste modo, é importante o desenvolvimento de pesquisas que busquem coberturas verdes com maior capacidade de absorção de poluentes.

Diante do exposto, surgiu o interesse de avaliar o controle qualitativo e quantitativo oferecido por diferentes sistemas de coberturas verdes na cidade Florianópolis-SC, local onde ainda não foram realizados estudos referentes ao controle hidrológico oferecido por esta técnica. Deste modo torna-se importante conhecer o comportamento deste tipo de cobertura frente às condições climáticas desta cidade



### 3 MATERIAIS E MÉTODO

A presente pesquisa possui caráter experimental e corresponde à avaliação do comportamento de diferentes tipos de coberturas verdes e de uma cobertura convencional no controle do escoamento pluvial, tanto em âmbito quantitativo quanto qualitativo. Deste modo, neste capítulo serão descritos os materiais que foram utilizados para montagem do experimento e o método adotado para alcançar os objetivos propostos.

O estudo compreendeu o monitoramento de quatro protótipos, os quais simularam uma cobertura convencional, com telha de fibrocimento, uma cobertura verde contínua e dois sistemas distintos de coberturas verdes modulares. Após a coleta de dados, foram determinadas algumas variáveis capazes de caracterizar o comportamento de cada cobertura no controle do escoamento pluvial. Por fim, considerando-se que a água escoada seja aproveitada em usos onde a potabilidade não seja exigida, realizou-se uma análise por meio de simulação computacional, onde foi possível verificar o potencial de economia de água potável que pode ser obtido em cada cobertura. Deste modo, o método consistiu em quatro etapas principais:

1. Sistema de monitoramento: esta etapa compreendeu a definição e a descrição do local de instalação do experimento, dos materiais utilizados para construção dos protótipos, do processo de montagem de cada cobertura e do modo em que os dados foram coletados;
2. Análise quantitativa: nesta etapa foram determinadas as variáveis que caracterizam a capacidade de cada cobertura em controlar quantitativamente o escoamento pluvial. O tratamento dos dados e a comparação de resultados foram realizados por meio de análise e aplicação de métodos estatísticos;
3. Análise qualitativa: nesta etapa foram descritos os parâmetros que foram avaliados para caracterizar a qualidade do escoamento de cada cobertura. Também foi descrito o procedimento utilizado para realizar a coleta das amostras e os métodos aplicados para determinação da concentração de cada parâmetro. O tratamento dos dados e a comparação de resultados foram realizados por meio de análise e aplicação de métodos estatísticos;
4. Simulação computacional: nesta etapa foi descrito o programa computacional adotado para realizar as simulações, bem como as variáveis que foram utilizadas como dados de entrada. Deste modo foi possível verificar o potencial de economia de água potável que pode ser obtido em cada cobertura analisada.

### 3.1 SISTEMA DE MONITORAMENTO

Nesta seção serão apresentadas as características de cada cobertura e do local de instalação das mesmas. Também será descrito o procedimento adotado para coleta e tratamento dos dados.

Os protótipos foram instalados no dia 20 de abril de 2016 e o monitoramento iniciou no início do mês de junho do mesmo ano. Este período foi utilizado para adaptação das coberturas verdes as condições climáticas do local, sendo que até o dia 20 de maio elas foram irrigadas diariamente para permitir a proliferação da camada de vegetação. Também observou-se o comportamento do escoamento das coberturas verdes após a ocorrência de eventos chuvosos, a fim de definir os pontos de coleta da água.

Os protótipos foram monitorados até o mês de janeiro de 2017, totalizando oito meses de monitoramento. Durante este período foi possível verificar se houve alteração no comportamento das coberturas verdes com o aumento de sua idade. Destaca-se que durante o monitoramento as coberturas não foram irrigadas. O primeiro evento de precipitação monitorado ocorreu no dia 16 de junho, sendo que todos os protótipos encontravam-se na mesma condição, com elevada capacidade de armazenamento, devido aos quinze dias anteriores terem sido secos e ensolarados. Durante o período compreendido entre os dias 17 e 28 de dezembro não houve monitoramento.

#### 3.1.1 Local de instalação

A pesquisa foi desenvolvida na cidade de Florianópolis, a qual, segundo a classificação de Köppen-Geiger, localiza-se na região climática Cfa, que corresponde a um clima temperado subtropical úmido. De acordo com a série histórica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015), que compreende o período entre 1961 e 2015, Florianópolis apresenta uma precipitação média anual de 1518 mm, sendo que a maior média mensal foi igual a 200 mm, no mês de fevereiro, e a menor foi igual a 89,5 mm no mês de junho. Os períodos de maior precipitação correspondem aos meses de verão, porém há ocorrência de chuvas durante o ano inteiro, sem períodos de seca definidos.

A bancada para montagem dos protótipos foi instalada na cobertura do bloco B do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. A escolha deste local se deve a possibilidade da bancada ficar exposta ao sol e às intempéries climáticas, simulando uma situação real. Ainda, próximo a este local, localiza-se a

estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, onde foi possível ter acesso às informações referentes à precipitação, radiação solar direta, temperatura do ar, umidade do ar, direção e velocidade do vento. Estas variáveis auxiliaram na compreensão do comportamento das coberturas analisadas.

### 3.1.2 Sistema da bancada

O sistema projetado contempla duas bancadas de madeira, sendo que cada uma possui duas caixas individuais de área interna igual a  $1\text{m}^2$  e altura igual a 27 cm, como pode ser visto na Figura 2. Deste modo, cada cobertura analisada foi disposta em uma destas caixas. A altura do sistema de apoio é igual a 1m, e com isto, as dimensões de cada bancada são iguais a 2,08m x 1,04m x 1,27m. O material utilizado foi a madeira de pinus autoclavado, devido sua elevada durabilidade e resistência à umidade.

**Figura 2 - Bancada de madeira para instalação dos protótipos.**



### 3.1.3 Tipos de cobertura verde

As coberturas verdes analisadas neste estudo correspondem a dois sistemas modulares disponíveis comercialmente e um sistema de cobertura verde contínua.

A estrutura das coberturas verdes foi impermeabilizada com uma lona plástica de PVC, com espessura de 120 micras e dupla camada, a qual foi disposta na base das caixas de madeira para evitar a infiltração de água da chuva, como pode se observar na Figura 3. Este material possui boa resistência mecânica e impermeabilidade segura, sendo muito utilizado para montagem de estufas que cultivam algumas espécies vegetais ou para hidroponia.

**Figura 3 - Impermeabilização das caixas com lona plástica para instalação das coberturas verdes.**



O substrato utilizado foi obtido na empresa Teto Vivo, localizada em Florianópolis. Esta empresa é especialista em coberturas verdes na região e desenvolveu a composição de seu substrato com o passar dos anos, obtendo um material leve e bem aerado. Com relação à vegetação, optou-se por utilizar a grama São Carlos, por ser uma espécie que resiste bem a períodos frios e que necessita de pouca manutenção. A Figura 4 mostra a vegetação e o substrato utilizado.

**Figura 4 - Substrato comercial e grama da espécie São Carlos utilizados nas coberturas verdes.**

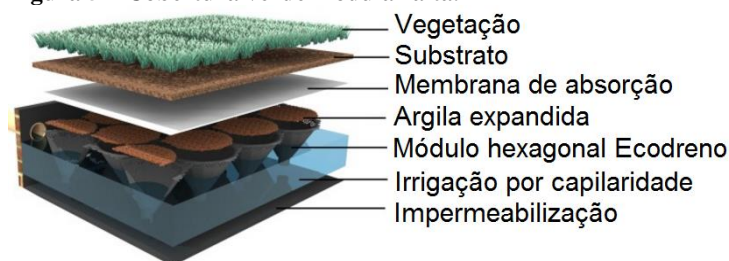


A seguir são detalhadas as características específicas e o processo de montagem de cada sistema de cobertura verde avaliado.

### 3.1.3.1 Cobertura verde modular alta

A cobertura verde modular alta não necessita de irrigação com água potável, visto que pode armazenar até 160 litros de água por metro quadrado. Contudo, este tipo de cobertura só pode ser instalado em lajes planas, pois funciona como um reservatório de detenção. Ela é composta pelos seguintes materiais: membrana de impermeabilização, módulo rígido de plástico reciclado para drenagem controlada da água, argila expandida, membrana de absorção, substrato e vegetação. A Figura 5 apresenta a composição de cada camada e sua disposição na estrutura do telhado.

**Figura 5 – Cobertura verde modular alta.**



Fonte: Ecotelhado, 2015.

Após a impermeabilização da estrutura de apoio com lona plástica, seguiu-se o manual de instalação disponibilizado pela empresa Ecotelhado. Primeiramente encaixaram-se os módulos hexagonais Ecodreno entre si e em seguida assentou-os dentro da caixa de madeira. O interior de cada módulo foi todo preenchido com argila expandida. Acima dos módulos colocou-se uma membrana de absorção, fornecida pela empresa Ecotelhado, que funciona como a camada de filtragem. Sobre esta, adicionou-se uma fina camada de substrato, de aproximadamente 1 cm, e por fim, a grama São Carlos em forma de leiva. A drenagem foi feita instalando-se um dreno na lateral da bancada, a uma altura de 16 cm, como especificado no manual da empresa. Neste sistema, quando se utiliza vegetação em forma de leiva, não há necessidade de adicionar substrato. Porém, optou-se por utilizar uma pequena quantidade deste material, de modo a facilitar a proliferação da vegetação. A Figura 6 apresenta os passos que foram seguidos para a montagem do protótipo.

**Figura 6 - Montagem da cobertura verde modular alta.**



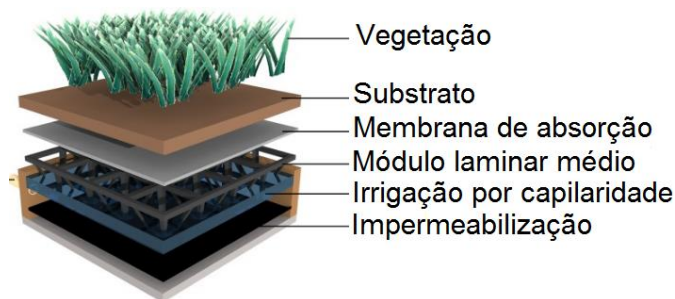
### *3.1.3.2 Cobertura verde modular baixa*

A cobertura verde modular baixa é semelhante a modular alta, porém sua capacidade de armazenamento de água é reduzida, sendo capaz de reter de 50 a 60 litros por metro quadrado. Este tipo de cobertura também necessita ser instalado em lajes planas. Ela é composta por:



membrana de impermeabilização, módulo semiflexível Piso Nuvem para drenagem controlada da água, membrana de absorção, substrato e vegetação. Esta cobertura não utiliza argila expandida na camada de drenagem. O desenho esquemático das camadas é apresentado na Figura 7.

**Figura 7 – Cobertura verde modular baixa.**



Fonte: Ecotelhado, 2015.

Para sua montagem, após a impermeabilização da estrutura de apoio com lona plástica, seguiu-se o manual de instalação disponibilizado pela empresa Ecotelhado. Os passos realizados são semelhantes aos utilizados para montagem da cobertura verde modular alta, detalhado anteriormente. A diferença entre os dois é a altura do dreno instalado na lateral da bancada, sendo que nesta cobertura especifica-se que ele esteja a uma altura de 7 centímetros. Além disto, não é necessária a adição de argila expandida. A Figura 8 apresenta os passos que foram seguidos para a montagem do protótipo.

**Figura 8 – Montagem da cobertura verde modular baixa.**



### *3.1.3.3 Cobertura verde contínua*

A cobertura verde contínua é caracterizada por não utilizar módulos de plástico em sua composição. A Figura 9 apresenta todos os passos adotados para instalação deste protótipo.

**Figura 9 - Montagem da cobertura verde contínua.**



Para sua instalação, após realizar a impermeabilização da caixa de madeira com lona plástica, instalou-se um dreno no fundo da estrutura, de maneira a proporcionar a saída de água da cobertura. O protótipo foi montado com uma inclinação de aproximadamente 2%, o mínimo necessário para permitir a drenagem da água. Acima do dreno colocou-se uma fina tela de *nylon* para impedir que partículas da camada de drenagem entupissem o sistema. A camada de drenagem foi composta por 3 cm de argila expandida. Acima desta, foi colocada uma membrana geotêxtil Bidim, que funciona como filtro, evitando a passagem de

partículas do substrato para o sistema de drenagem. Sobre ela, adicionou-se a camada de substrato, com uma espessura total de 7 cm, enquadrando a cobertura no tipo extensiva. Por fim, assentou-se a camada de vegetação sobre o substrato, a qual foi composta pela grama São Carlos em forma de leiva.

### 3.1.4 Cobertura convencional

Com o objetivo de simular um tipo de cobertura frequentemente observado nas edificações, a cobertura convencional foi montada com telha de fibrocimento. Optou-se por utilizar uma telha que já foi utilizada anteriormente, a fim de simular uma situação mais próxima da condição das edificações já existentes.

A caixa de madeira foi cortada de maneira a formar uma estrutura de apoio para a telha de fibrocimento e garantir a inclinação de 10%, respeitando o valor mínimo especificado para este tipo de material. Para drenagem da água, foi instalado um tubo de PVC no limite inferior da telha, o qual conduziu o escoamento para um dreno acomodado em sua extremidade. Este dreno foi ligado a um reservatório de armazenamento por um sifão. As laterais do cano foram fechadas com cabeceiras para calhas. A Figura 10 apresenta a cobertura convencional montada. O tubo foi cortado de maneira a permitir que somente a precipitação que incide sobre a telha seja direcionada ao reservatório.

**Figura 10 – Cobertura convencional com telha de fibrocimento.**



### 3.1.5 Coleta dos dados

#### 3.1.5.1 Altura pluviométrica de cada evento

A altura pluviométrica de cada evento foi obtida por meio dos dados da estação meteorológica instalada a poucos metros do local de desenvolvimento do estudo. Estes dados são disponibilizados digitalmente e são atualizados a cada minuto. Para verificar sua consistência, eles foram comparados com os dados da estação meteorológica automática da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI, localizada em Florianópolis. Os dados desta estação também foram obtidos digitalmente, porém eles são disponibilizados em base horária. Além disso, para corroborar com os dados digitais, instalou-se um pluviômetro no local de medição, seguindo os procedimentos adotados por Jobim (2014). O mesmo foi acomodado em local descoberto, a 1,20 metros da superfície, como pode se observar na Figura 11. O pilar de madeira em que o pluviômetro está fixado não mostrou causar interferência nos resultados obtidos, visto que sua extremidade não está encostada na madeira.

**Figura 11 - Pluviômetro instalado nas imediações da bancada dos protótipos.**



A partir da revisão bibliográfica, considerou-se um evento como independente quando o período sem precipitação for igual ou maior que vinte e quatro horas. Adotou-se este valor de maneira a garantir que os dados de cada evento fossem coletados antes da ocorrência de outro.

Os eventos analisados foram caracterizados em relação à sua altura pluviométrica e também, em relação à condição de umidade antecedente dos cinco dias anteriores ao evento. Isto foi feito para verificar o comportamento das coberturas verdes frente às diferentes condições de cada evento, visto que na literatura estes fatores mostraram ter influência significativa no seu desempenho.

Quanto à altura pluviométrica de cada evento, os intervalos de classificação foram definidos de maneira a permitir a obtenção de amostras com número de elementos semelhantes em cada categoria. Deste modo os eventos de chuva foram classificados como:

- Eventos leves: altura da precipitação menor que 10 milímetros;
- Eventos moderados: altura da precipitação entre 10 e 30 milímetros;
- Eventos pesados: altura da precipitação maior que 30 milímetros.

Com relação à condição de umidade antecedente (*Antecedent Moisture Condition – AMC*), os eventos foram classificados por meio da determinação da precipitação acumulada nos cinco dias anteriores a ele. Conforme Tucci (2005) existem três condições de umidade antecedente:

- AMC I: A precipitação acumulada nos cinco dias anteriores ao evento é menor que 13 milímetros;
- AMC II: A precipitação acumulada nos cinco dias anteriores ao evento é maior que 13 milímetros e menor 28 que milímetros;
- AMC III: A precipitação acumulada nos cinco dias anteriores ao evento é maior que 28 milímetros.

### 3.1.5.2 *Escoamento gerado pelos sistemas*

Para coleta da água escoada, foram assentadas caixas d'água embaixo de cada protótipo, cada qual com capacidade de armazenamento de 100 litros. O escoamento de cada sistema foi direcionado ao interior de seu respectivo reservatório por meio de uma mangueira plástica, a qual interligou o dreno de saída de água até o reservatório de armazenamento. Devido a limitações construtivas, na cobertura de fibrocimento utilizou-se um sifão no lugar da mangueira. Na Figura 12 é mostrado o sistema de coleta do escoamento.

O volume de água em cada reservatório é o resultado do total de chuva precipitado menos a quantidade que ficou retida no sistema. Ao fim de cada evento chuvoso, ele foi determinado de forma manual, com o auxílio de recipientes graduados. Após este procedimento os reservatórios



foram devidamente higienizados para garantir maior confiabilidade dos resultados de qualidade da água.

O volume precipitado em cada sistema corresponde à multiplicação entre a respectiva área de captação e a altura pluviométrica do evento chuvoso. A área de captação de cada sistema foi obtida com auxílio de uma trena. Os sistemas de cobertura verde modular apresentaram uma área interna de  $0,96\text{m}^2$ , o sistema de cobertura verde contínuo uma área de  $0,98\text{m}^2$ , e o sistema de cobertura de fibrocimento uma área de  $1,24\text{m}^2$ .

**Figura 12 - Sistema de coleta do escoamento pluvial.**



### 3.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

Esta análise foi realizada com o objetivo de determinar a capacidade de retenção do escoamento pluvial de cada sistema, e verificar se os mesmos apresentaram diferenças entre si. Para isso, alguns parâmetros hidrológicos foram determinados e, por meio de métodos estatísticos, foi possível realizar comparações entre os resultados obtidos. Também foi analisada a influência da altura pluviométrica de cada evento e o período de dias secos antecedentes a ele, a fim de verificar como as condições extrínsecas afetaram o desempenho dos sistemas.

### 3.2.1 Determinação do coeficiente de escoamento

O coeficiente de escoamento foi determinado para cada sistema analisado a fim de caracterizar a influência de cada cobertura no controle quantitativo da água da chuva. Seus valores variam no intervalo de 0 a 1 e representam a porcentagem da precipitação que é convertida em escoamento superficial. Quanto mais próximo à unidade, menor é a eficiência da cobertura, ou seja, menor sua capacidade de retenção. Este coeficiente foi obtido por meio da utilização da Equação 6.

$$C = \frac{V_e}{V_{ch}} \quad (6)$$

Onde:

C é o coeficiente de escoamento (adimensional);

$V_e$  é o volume escoado por cada sistema (L);

$V_{ch}$  é o volume de chuva precipitado (L).

O volume escoado corresponde ao volume armazenado dentro do reservatório após o término do evento chuvoso, e o volume precipitado, a quantidade de chuva que precipitou sobre a superfície de captação.

Como descrito anteriormente, durante as observações no primeiro mês após a instalação dos protótipos, percebeu-se que não houve acúmulo de água na superfície da cobertura verde após a ocorrência de eventos de precipitação, e mesmo se ocorresse, não haveria escoamento no sistema contínuo devido à sua mínima inclinação, tampouco nos sistemas modulares, que foram instalados de maneira plana. Deste modo, considerou-se como escoamento superficial a água que atravessa todas as camadas da cobertura verde, ou seja, o volume que iria efetivamente para o sistema de drenagem em uma construção real. As paredes laterais da bancada foram construídas com uma altura maior do que a camada de vegetação da cobertura verde, para evitar que caso ocorra acúmulo de água, o mesmo não seja escoado para fora da caixa de madeira.

### 3.2.2 Determinação do potencial de retenção

O potencial de retenção da água da chuva por unidade de área de cada protótipo foi determinado por meio da divisão entre o volume retido em cada sistema e a sua área de captação, como mostra a Equação 7.



$$R = \frac{V_r}{A_s} \quad (7)$$

Onde:

R é o potencial de retenção (L/m<sup>2</sup>);

V<sub>r</sub> é o volume retido em cada sistema (L);

A<sub>s</sub> é a área de captação de cada protótipo (m<sup>2</sup>).

O volume de água armazenado em cada sistema foi obtido por um balanço hídrico simplificado: corresponde à subtração entre o volume precipitado e o volume armazenado em cada reservatório. Para as duas coberturas verdes modulares foi possível comparar os valores obtidos experimentalmente com os valores fornecidos pela empresa Ecotelhado.

### 3.2.3 Tratamento dos dados

Após a determinação dos valores de coeficiente superficial dos protótipos para cada evento monitorado, foi realizada uma análise estatística descritiva a fim de calcular os valores médios, máximos e mínimos e o desvio padrão de cada amostra. Os resultados também foram apresentados de maneira gráfica a fim de expor de maneira clara o comportamento de cada sistema.

Para melhorar a compreensão e visualização dos resultados, os valores de coeficiente de escoamento superficial obtidos para cada sistema foram organizados de acordo com a classificação do evento, considerando-se isoladamente a altura pluviométrica e a condição de umidade antecedente. Os dados agrupados também foram analisados estatisticamente e apresentados em forma de tabelas.

A comparação entre os resultados observados nos diferentes tipos de cobertura analisados foi realizada por meio da aplicação de métodos estatísticos. O coeficiente de escoamento superficial foi o parâmetro escolhido para verificar se houve diferença significativa entre o comportamento dos sistemas. Primeiramente, constatou-se a possibilidade dos dados seguirem uma distribuição normal utilizando-se o teste de Shapiro-Wilk, com grau de significância igual a 0,05. Este teste investiga se uma amostra aleatória segue os pressupostos da normalidade por meio do cálculo de uma variável estatística denominada W. Esta variável é determinada utilizando-se a Equação 8.

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x(i) - \mu)} \quad (8)$$

Onde:

$x_{(i)}$  são os valores da amostra ordenados em ordem crescente;

$\mu$  é a média da amostra;

$n$  é o número de elementos da amostra.

O valor de  $b$  é obtido por meio da Equação 9, se o número de elementos for par, ou com a Equação 10, se o número de elementos for ímpar.

$$b = \sum_{i=1}^{n/2} a(n-i+1) \cdot (x(n-i+1) - x(i)) \quad (9)$$

$$b = \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a(n-i+1) \cdot (x(n-i+1) - x(i)) \quad (10)$$

Onde:

$a_{(n-i+1)}$  são constantes definidas pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra com distribuição normal e número de elementos igual a  $n$ .

A hipótese de normalidade é rejeitada se o valor de  $W$ , calculado por meio da Equação 8, for menor que o  $W$  crítico, valor tabelado para amostras com  $n$  elementos e grau de significância de 0,05.

Como não se observou evidências de normalidade, aplicou-se o método não paramétrico de Kruskal-Wallis, que é utilizado para grupos independentes com múltiplos tratamentos. Inicialmente, devem-se agrupar os dados de todas as amostras e organizá-los em ordem crescente. A cada elemento da amostra é atribuído um posto, que inicia em 1 e termina no valor da soma de todos os elementos. Quando ocorre empate, ou seja, quando os elementos possuem o mesmo valor, deve-se atribuir como posto a média dos postos correspondentes. Com isto, é possível calcular o valor da estatística teste por meio da Equação 11.

$$H = \frac{12}{n \cdot (n+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3 \cdot (n+1) \quad (11)$$

Onde:

$H$  é a estatística teste;

$n$  é o número de elementos de todas as amostras;

$n_i$  é o número de elementos da  $i$ -ésima amostra;

$R_i$  é o somatório dos postos da  $i$ -ésima amostra.

A hipótese de igualdade de médias é rejeitada quando o valor de  $H$  for maior que o valor tabelado para uma variável qui-quadrado, com nível

de significância igual a 0,05 e graus de liberdade igual ao número total de elementos menos um.

Como a hipótese de igualdade de médias não foi aceita, utilizou-se outro método não paramétrico, o teste de Mann-Whitney, a fim de verificar quais foram as coberturas que apresentaram diferenças significativas entre si.

O teste de Mann-Whitney é utilizado para comparação de grupos independentes, com dois tipos de tratamentos, ou seja, comparam-se as amostras aos pares. Primeiramente, os dados das duas amostras a serem comparadas são agrupados em ordem crescente, atribuindo-se postos a posição que cada elemento ocupa. Quando ocorre empate, ou seja, se dois ou mais valores forem idênticos, deve-se atribuir como posto a média dos postos correspondentes. Com isto, pode-se calcular o valor de U, determinado pela Equação 12.

$$U = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1 \cdot (n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (12)$$

Onde:

U é o valor da estatística teste;

$n_1$  é o número de casos da amostra com menor quantidade de observações;

$n_2$  é o número de casos da amostra com maior quantidade de observações;

$R_1$  é a soma dos postos da amostra com menor quantidade de observações.

Após a determinação do valor de U, utiliza-se Equação 13 para calcular o valor da estatística do teste.

$$Z = \frac{u - \mu_{(u)}}{\sigma_{(u)}} \quad (13)$$

Onde:

z é o valor da estatística teste;

$\mu_{(u)}$  é a média da distribuição u;

$\sigma_{(u)}$  é a variância da distribuição u.

A média e a variância da distribuição u são obtidas, respectivamente, por meio das Equações 14 e 15.

$$\mu_{(u)} = \frac{n_1 \cdot n_2}{2} \quad (14)$$

$$\sigma_{(u)} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (15)$$

Onde:

$\mu_{(u)}$  é a média da distribuição  $u$ ;

$\sigma_{(u)}$  é a variância da distribuição  $u$ ;

$n_1$  é o número de casos da amostra com menor quantidade de observações;

$n_2$  é o número de casos da amostra com maior quantidade de observações.

A hipótese de igualdade de médias é rejeitada se o valor de  $z$ , calculado por meio da Equação 13, for menor que o intervalo crítico obtido para uma distribuição  $z$ , considerando-se um grau de significância igual a 0,05. Para realização de todos os testes estatísticos utilizou-se o *software* STATISTICA® 13. Neste programa, a hipótese de igualdade é aceita se o valor de  $p$  fornecido pelo programa for menor que 0,05.

### 3.3 ANÁLISE QUALITATIVA

Está análise foi realizada com o objetivo de determinar a qualidade do escoamento gerado pelos diferentes tipos de cobertura verde e pela cobertura convencional. A fim de verificar se estas coberturas atuam como fonte de poluentes ou se as mesmas são capazes de retê-los, a qualidade da água da chuva, coletada diretamente da atmosfera, também foi determinada. Foram analisados parâmetros físicos, químicos e microbiológicos.

Com os resultados obtidos foram realizadas análises estatísticas para verificar se a qualidade da água escoada pelos diferentes tipos de cobertura apresentou diferenças significativas entre si.

Nas subseções abaixo está descrito o método que foi utilizado para coleta das amostras, para determinação dos parâmetros de qualidade avaliados e para a análise e comparação dos dados.

#### 3.3.1 Parâmetros a serem analisados

Com o objetivo de verificar se o escoamento gerado pelos diferentes tipos de cobertura verde e pela cobertura convencional atende a qualidade exigida para usos não potáveis, os parâmetros descritos na NBR 15.527 foram avaliados. Estes parâmetros correspondem ao pH, à turbidez, à cor aparente e à presença de coliformes totais e termotolerantes. A norma também especifica que seja avaliada a presença de cloro residual livre no caso de serem utilizados compostos de cloro para desinfecção. Como este não é o caso do presente trabalho, não foi necessário analisar este parâmetro.

Além disso, como visto na revisão de literatura, o escoamento das coberturas verdes frequentemente apresenta grande quantidade de nutrientes. Deste modo as concentrações dos parâmetros referentes à amônia, ao nitrito, ao nitrato, ao fósforo e ao fosfato foram analisadas. Com relação à presença de metais, observou-se que eles são parâmetro que possuem menor influência na alteração da qualidade do escoamento deste tipo de cobertura, sendo verificada somente a presença de ferro no presente estudo.

### **3.3.2 Coleta e armazenamento das amostras**

A coleta da água da chuva foi realizada por meio da instalação de um recipiente plástico próximo ao local do monitoramento. Assim, foi possível coletar a água precipitada diretamente da atmosfera sem que ocorra sua passagem por outras superfícies. Destaca-se que o recipiente foi devidamente higienizado antes da ocorrência dos eventos chuvosos, de modo a evitar que a deposição de partículas trazidas pelo vento não afetasse o resultado da qualidade da água.

As amostras do escoamento de cada cobertura analisada foram coletadas ao término de cada evento chuvoso. O ponto de coleta correspondeu ao reservatório de armazenamento instalado em cada protótipo. A água armazenada nos reservatórios foi homogeneizada no momento de cada coleta, de maneira que permitisse a obtenção de uma amostra representativa do escoamento. Para os ensaios dos parâmetros físicos e químicos as amostras foram coletadas em garrafas plásticas de 500 mL, devidamente higienizadas antes de cada coleta. Para a análise dos parâmetros microbiológicos foram utilizados frascos que foram esterilizados antes da coleta. Em alguns eventos não foi possível realizar a análise da água de alguns sistemas, pois o escoamento foi nulo ou com volume insuficiente para realização dos testes. Logo após as amostras terem sido coletadas foram realizados os ensaios para determinação da concentração de cada parâmetro.

### **3.3.3 Métodos e equipamentos utilizados na análise**

Para realização das análises das amostras de água foram utilizados diferentes equipamentos e métodos, conforme o parâmetro avaliado.

A concentração dos parâmetros microbiológicos foi determinada no laboratório biológico, localizado em Florianópolis-SC, onde as amostras foram analisadas por meio do método quantitativo de filtração.

A determinação da concentração de amônia foi realizada por meio do método da comparação colorimétrica, utilizando um card kit da empresa Alfakit. Seguiram-se os respectivos manuais de instrução e reagentes químicos para sua determinação. A Figura 13 apresenta o material utilizado nesta análise. Percebe-se que a reação entre a amônia e os reagentes provoca uma coloração verde-azulada nas amostras.

**Figura 13 - Kit de comparação colorimétrica utilizado para determinar a concentração de amônia.**



Para determinação dos parâmetros referentes ao nitrito, ao nitrato, ao fósforo, ao fosfato e ao ferro utilizou-se o aparelho Fotocolorímetro AT 10P (Figura 14), também da empresa Alfakit, que possui resolução de 0,01 mg/L e precisão relativa de 2%. A análise de cada parâmetro foi realizada seguindo o seu respectivo manual de instrução e reagente químico. Os aparelhos e reagentes da Alfakit utilizados nestas medições foram disponibilizados pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE).

**Figura 14 - Fotocolorímetro utilizado para determinação da concentração de ferro, fósforo, fosfato, nitrato e nitrito.**



Os parâmetros referentes ao pH e ao oxigênio dissolvido foram determinados utilizando um medidor multiparâmetro digital HQ40D, da marca Hach. Este aparelho é conectado as respectivas sondas, que fornecem ambos os valores com resolução igual a 0,01. Para determinação da cor aparente utilizou-se um espectrofotômetro visível, modelo DR2800, da marca Hach. A turbidez foi medida utilizando um turbidímetro, modelo 2100N, da marca Hach, com resolução de 0,001. Para todas as medições, seguiram-se as recomendações de uso referentes a cada aparelho. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Na Figura 15 são apresentados os aparelhos descritos

**Figura 15- Aparelhos utilizados no Laboratório de Potabilização das Águas para determinação de alguns parâmetros.**



a) Multiparâmetro digital HQ40D



b) Espectrofotômetro visível DR2800



c) Turbidímetro 2100N

A análise de coliformes totais e termotolerantes também foi realizada no LAPOA. Para este teste utilizou-se cartelas de contagem de coliformes Colilert, que estão apresentadas na Figura 16.

As amostras foram coletadas e analisadas ao fim de cada evento de precipitação. Entretanto, como a NBR 15.527 exige somente a análise semestral de coliformes totais e termotolerantes e tendo em vista que o período de monitoramento foi de sete meses, estes parâmetros foram analisados em apenas um evento de chuva.

A Tabela 10 apresenta todos os parâmetros medidos, sua respectiva unidade, faixa de medição e o método utilizado anteriormente e disponibilizados para uso pelo supracitado laboratório.

**Figura 16 - Cartelas Colilert® utilizadas para determinação dos coliformes totais e termotolerantes.**





**Tabela 10 - Ensaios de qualidade da água realizados.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método</b>	<b>Faixa de medição</b>
Ferro	mg/L (Fe)	Tiocianato	0,10-5,00
Fósforo	mg/L (P)	Vanadomolibdico	0,10 - 5,00
Fosfato	mg/L (PO <sub>4</sub> )	Azul de Molibdênio	0,10 - 3,00
Nitrato	mg/L (N-NO <sub>3</sub> )	N-(1-naftil)-etilenodiamina	0,10 – 2,50
Nitrito	mg/L (N-NO <sub>2</sub> )	Naftilamina	0,03 - 0,60
Amônia	mg/L (N-NH <sub>3</sub> )	Azul de Indofenol	0,00-3,00
Oxigênio dissolvido	mg/L	-	0,1-20,0
pH	-	Potenciométrico	0-14
Turbidez	NTU	Nefelometrico 90°	0-10.000
Cor aparente	uC	Platinum Cobalt	0-700
Coliformes totais	NMP / 100 MI	Colilert®	-
Coliformes termotolerantes	NMP / 100 mL	Colilert®	-

### 3.3.4 Tratamento dos dados

Após a determinação das concentrações de cada parâmetro, foi realizada uma análise estatística descritiva a fim de calcular os valores médios, máximos e mínimos bem como o desvio padrão. Apenas os parâmetros referentes ao pH, cor aparente e turbidez foram medidos em triplicata. Nestes casos, a concentração em cada evento monitorado foi obtida por meio da média das três medições.

Os dados tratados foram analisados a fim de compreender o comportamento de cada cobertura na qualidade do escoamento gerado. Para visualização do intervalo de concentração de cada parâmetro foram elaborados gráficos do tipo *boxplot*. Neste tipo de gráfico é apresentado o valor mínimo, o valor do primeiro quartil (25% dos dados são menores que ele), o valor da mediana e o valor do terceiro quartil (75% dos dados são menores que ele). Optou-se por também representar as concentrações médias de cada intervalo, denotando-se seus valores no gráfico por meio da utilização de um triângulo.

Para verificar se as concentrações de cada parâmetro apresentaram diferença significativa entre os escoamentos gerados pelos diferentes sistemas analisados foram utilizados os métodos estatísticos *t-test*, Mann-Whitney e Kruskal-Wallis. Para definir qual método utilizar, primeiramente verificou-se a condição de normalidade dos dados por meio da utilização do teste de Shapiro-Wilk. Caso os dados obtidos sigam uma distribuição normal, será utilizado o método paramétrico *test-t* para comparação das médias, considerando-se as amostras aos pares.

Neste método, primeiramente calcula-se a variável *t* por meio da Equação 16.

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{S_c \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (16)$$

Onde:

$\mu_1$  é a média da amostra 1;

$n_1$  é o tamanho da amostra 1;

$\mu_2$  é a média da amostra 2;

$n_2$  é o tamanho da amostra 2;

$S_c$  é o desvio padrão estimado.

O desvio padrão estimado é determinado por meio da Equação 17.

$$S_c = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (17)$$

Onde:

$s_1$  é o desvio padrão da amostra 1;

$n_1$  é o tamanho da amostra 1;

$s_2$  é o desvio padrão da amostra 2;

$n_2$  é o tamanho da amostra 2.

A hipótese de igualdade de médias é aceita se o valor de *t* calculado por meio da Equação 16 for menor que o valor de *t* obtido nas tabelas de distribuição de Student, com nível de significância igual a 0,05 e com grau de liberdade igual a  $n_1 + n_2 - 2$ .

Em contrapartida, se a hipótese de normalidade for descartada, a comparação dos resultados será realizada por meio do método não paramétrico de Kruskal-Wallis, o qual é aplicado a grupos independentes com múltiplos tratamentos. No caso de o teste apontar que há diferença significativa entre as amostras, então será utilizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, o qual é aplicado a grupos independentes

com dois tratamentos distintos. Deste modo será possível verificar quais foram os sistemas que apresentaram diferenças significativas entre si. Todos os testes estatísticos realizados nesta seção também foram realizados com o *software* STATISTICA® 13. Os testes de Shapiro-Wilk, Kruskal-Wallis e Mann-Whitney foram detalhados na seção referente à análise quantitativa.

Por fim, o intervalo de concentração de cada parâmetro foi comparado com os valores padrões recomendados pela NBR 15.527, a fim de verificar se a qualidade do escoamento gerado por cada sistema atende a qualidade da água para uso não potável. Os demais parâmetros também foram confrontados com as recomendações da EMBRAPA, da NBR 13.969, do CONAMA e da publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações”. Porém, como apenas alguns parâmetros destas documentações foram medidos, não foi possível afirmar se a água escoada pelas coberturas atende as condições impostas para serem utilizadas nos diferentes casos considerados.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL DE CADA SISTEMA

A análise do potencial de redução de consumo de água potável para cada tipo de cobertura foi realizada por meio de simulação computacional, utilizando o programa Netuno 4. Os dados de entrada do programa necessários para realizar simulação são: precipitação em base diária da cidade, descarte do escoamento inicial, área de captação, coeficiente de escoamento superficial, demanda média diária de água potável, percentual de água potável que pode ser substituído por água da chuva, número de moradores e informações sobre os reservatórios, superior (opcional) e inferior (GHISI; CORDOVA, 2014).

O objetivo desta análise foi determinar o percentual de economia de água potável que as coberturas verdes estudadas neste trabalho podem alcançar, considerando-se que a água escoada por elas seja utilizada para fins não potáveis. A partir do monitoramento, determinou-se para cada cobertura o correspondente valor médio do coeficiente de escoamento superficial, que é um dado de entrada necessário para simulação.

Com isso, foram simulados diferentes cenários para cada tipo de cobertura, variando-se os dados de entrada referentes à área de captação, ao número de moradores e ao percentual de substituição de água potável. Os dados de entrada que foram considerados fixos correspondem à demanda de água potável por habitante, o descarte do escoamento inicial e a série de precipitação. Deste modo foi possível verificar o potencial de

economia de água potável que cada tipo de cobertura pode oferecer em diferentes situações na cidade de Florianópolis, considerando-se edificações residenciais unifamiliares.

### **3.4.1 Dados de precipitação**

Os dados de precipitação diários da cidade de Florianópolis foram obtidos no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). O arquivo corresponde às séries de precipitações diárias de 2002 a 2015 e vem no formato de células separadas por vírgula (CSV), como requer o programa utilizado no presente trabalho. A fonte destes dados é a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI).

### **3.4.2 Consumo de água potável**

Segundo a série histórica do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2016), a qual engloba o período entre 1995 e 2014, o consumo médio diário de água potável por habitante em Florianópolis é igual a 174,68 l/hab./dia. Deste modo, o consumo de água de água potável por habitante foi considerado igual a 175 l/hab./dia.

### **3.4.3 Descarte do escoamento inicial**

O descarte do escoamento inicial da chuva foi considerado igual a 2mm, como recomendado pela NBR 15527 (ABNT, 2007) nos casos em que não se dispõe de dados para o dimensionamento de um dispositivo para tal fim. Este descarte contribui para melhora da qualidade da água captada, visto que os detritos acumulados na superfície são carregados neste primeiro fluxo.

### **3.4.4 Área de captação**

Com o objetivo de analisar a influência da área de captação, tendo em vista que ela representa as diferentes coberturas analisadas nesta pesquisa, foram considerados os valores correspondentes a 90m<sup>2</sup>, 120m<sup>2</sup>, 150m<sup>2</sup> e 300m<sup>2</sup>, como adotado no trabalho de Ghisi e Schondermark (2013).

### **3.4.5 Número de moradores**

Em estudos realizados anteriormente, verificou-se que o número de moradores em cada domicílio varia entre 2 e 4 (GHISI, MONTIBELLER; SCHMIDT, 2006; GHISI; OLIVEIRA, 2007; ELETROBRÁS, 2007). Estes valores conferem com o censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa (IBGE), o qual indicou que as habitações familiares em Florianópolis apresentam 91,1% das residências com 2, 3 ou 4 moradores. Sendo assim, estes valores serão utilizados como dados de entrada nas simulações.

### **3.4.6 Percentual de substituição de água potável por água da chuva**

O percentual de substituição de água potável por água da chuva corresponde à parcela da demanda total de água potável da residência a ser suprida por água da chuva. Após a simulação, o Netuno disponibiliza o potencial de economia que de fato pode ser alcançado com o sistema de aproveitamento, o que depende do volume do reservatório utilizado e da demanda e disponibilidade de água da chuva.

Em uma residência, os usos não potáveis correspondem à água utilizada na máquina de lavar roupa, na bacia sanitária, para limpeza e para irrigação. Alguns estudos determinaram o percentual de usos não potáveis, apresentando valores entre 33,8% a 44,0% (GHISI; OLIVEIRA, 2007; GHISI; FERREIRA, 2007; WILLIS *et al.*, 2009). Eles dependem do hábito dos moradores, das condições climáticas, dos aparelhos hidrossanitários utilizados etc. Assim, para realizar uma análise generalizada, serão utilizados como percentuais de substituição de água potável por água da chuva os valores de 30%, 40% e 50%, como utilizado no trabalho de Ghisi e Schondermark (2013).

### **3.4.7 Volume dos reservatórios**

Para estimar o volume ideal do reservatório inferior, o algoritmo do programa Netuno relaciona o percentual de economia de água com o volume do reservatório. Definindo-se um volume máximo, um intervalo de volumes a serem simulados e uma diferença entre potenciais de economia de água potável é possível escolher um reservatório que atenda a demanda e seja mais viável tecnicamente e economicamente. Nesta pesquisa, as simulações foram realizadas considerando volumes de reservatório no intervalo de 1.000 a 20.000 litros, calculando-se o

percentual de economia a cada 500 litros. O volume do reservatório ideal será determinado no instante em que aumentando-se o volume em 500 litros, o potencial de economia de água potável correspondente for igual ou menor que 5%.

Para simulação também é necessário definir se o sistema terá reservatório superior, e se este for o caso, o volume do mesmo. Nesta pesquisa optou-se por utilizar reservatório superior, sendo que seu volume é igual à demanda diária de água da chuva considerada em cada caso.

### **3.4.8 Análise dos dados da simulação**

Para cada cenário considerado, o Netuno determinou a relação entre o volume do reservatório inferior e o correspondente percentual de economia obtido com o sistema de aproveitamento. Estes dados foram apresentados em forma de gráficos, a fim de verificar se um sistema de aproveitamento de água da chuva em edificações residenciais unifamiliares que possuam coberturas verdes pode alcançar um potencial de economia de água potável considerável, visto que nestes casos a disponibilidade de água é menor.

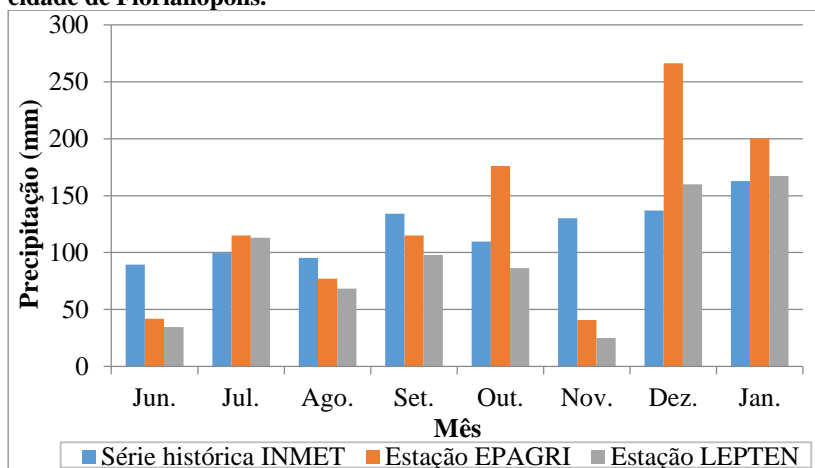
Como foram simuladas diferentes edificações para cidade de Florianópolis, variando-se o número de moradores, o tipo de cobertura, a área de captação e o percentual de substituição, os dados das simulações também foram analisados de forma a identificar quais foram os fatores que mostraram maior interferência no potencial de economia obtido por um sistema de aproveitamento de água da chuva.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PRECIPITAÇÕES NO PERÍODO MONITORADO

A Figura 17 apresenta um comparativo entre a precipitação pluviométrica mensal da série histórica de Florianópolis (1961 a 1990), obtida na base de dados do INMET, e a precipitação pluviométrica mensal ocorrida durante o período de monitoramento. Os dados mensais compreendidos entre junho de 2016 e janeiro de 2017 foram obtidos tanto na estação meteorológica automática da EPAGRI quanto na estação meteorológica do LEPTEN.

**Figura 17 - Comparativo entre as precipitações mensais da série histórica (1961-1990) e as precipitações monitoradas para o período de estudo na cidade de Florianópolis.**



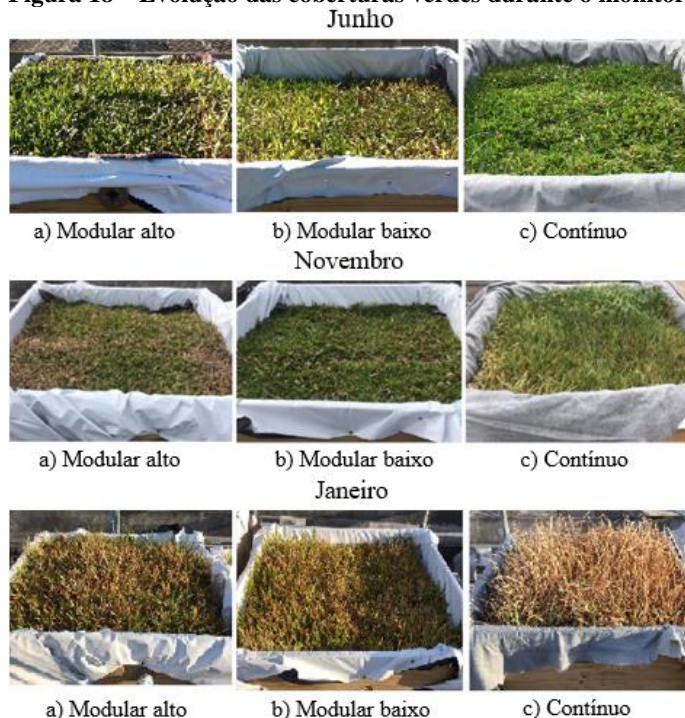
Verificou-se que a precipitação pluviométrica no período de monitoramento foi em geral menor do que a precipitação pluviométrica da série histórica, principalmente nos meses de junho e novembro. No mês de julho observou-se que a precipitação monitorada superou a série histórica, contudo, é importante destacar que este volume de chuva ocorreu em apenas dois dias, ou seja, o mês foi predominantemente seco, com a presença de apenas dois eventos de chuva muito intensos. Dezembro foi o período com maior quantidade de chuva, a precipitação monitorada superou a precipitação da série histórica e observaram-se

chuvas frequentes durante todo o mês. Os meses de setembro e janeiro apresentaram comportamento semelhante ao da série histórica.

Na maior parte dos meses os dados mensais obtidos na estação da EPAGRI foram maiores que na estação do LEPTEN, sendo que a maior diferença ocorreu no mês de dezembro. Isto pode ter ocorrido devido à distância entre estas duas estações, que é equivalente a 12km. As características do entorno também podem ter influenciado quantidade de chuva precipitada.

Em relação ao desenvolvimento e aparência estética das coberturas verdes observou-se que a carência de chuva combinada com as temperaturas mais elevadas do mês de novembro fez com que parte da vegetação secasse. Esta situação se agravou no fim do mês de janeiro. Embora a quantidade de chuvas tenha sido mais frequente neste período, as temperaturas elevadas agravaram o estado de seca da vegetação, principalmente na cobertura verde contínua. A Figura 18 apresenta uma fotografia das coberturas verdes nos meses de junho, novembro e janeiro.

**Figura 18 – Evolução das coberturas verdes durante o monitoramento.**





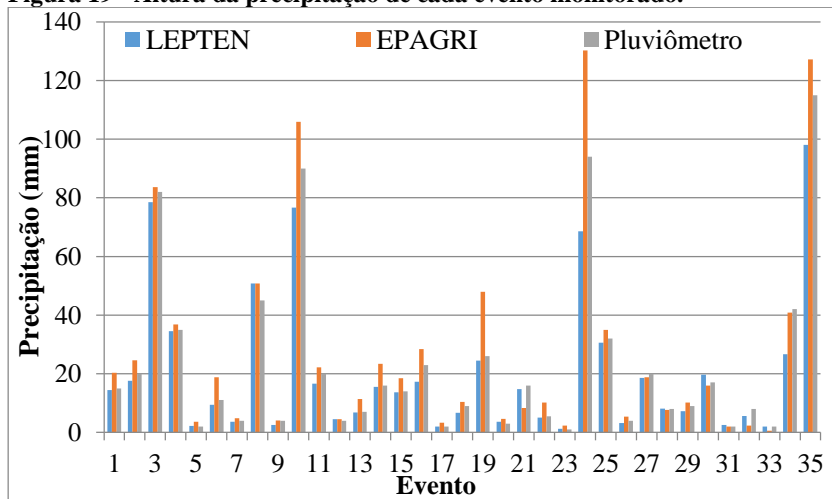
A presença de irrigação poderia ter amenizado o estresse hídrico a que as coberturas verdes ficaram submetidas. Contudo, como um dos objetivos do trabalho era verificar o comportamento das coberturas analisadas no clima de Florianópolis sem nenhuma intervenção, não houve irrigação no período de monitoramento.

A altura da precipitação de cada evento foi obtida por meio do pluviômetro instalado no local de medição, e também digitalmente, com os dados da estação meteorológica do LEPTEN e da EPAGRI. Os valores obtidos foram comparados entre si para verificar a consistência dos dados, como apresentado na Figura 19.

Verifica-se que os valores obtidos no pluviômetro e na estação meteorológica do LEPTEN apresentaram a mesma ordem de grandeza. A estação meteorológica da EPAGRI registrou a maior altura de precipitação na maior parte dos eventos, com algumas diferenças acentuadas, como por exemplo, nos eventos 10, 19 e 24. Isto pode ocorrer devido à maior distância da estação da EPAGRI do local onde o estudo foi realizado.

Deste modo, considerou-se como a altura da precipitação de cada evento, a média entre os valores obtidos no pluviômetro e na estação meteorológica do LEPTEN, visto que eles estão instalados a poucos metros do experimento e, deste modo, são mais condizentes com as possíveis interferências que possam ocorrer no local.

**Figura 19 - Altura da precipitação de cada evento monitorado.**



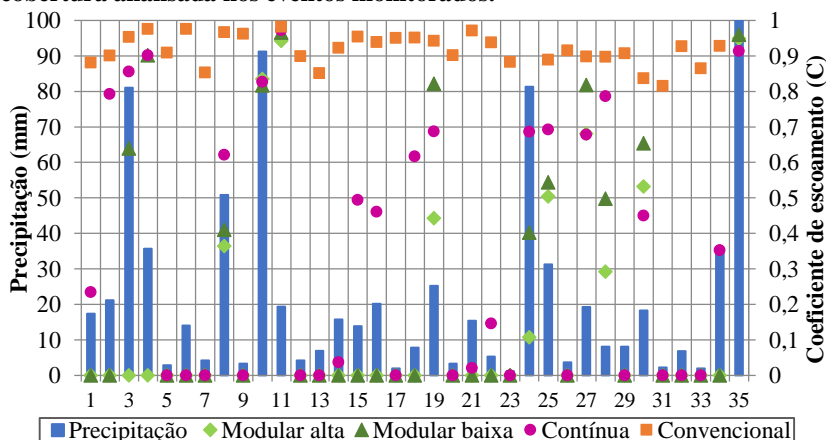
## 4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao desempenho do controle quantitativo do escoamento pluvial das coberturas analisadas. Para isso determinou-se os parâmetros referentes ao coeficiente de escoamento superficial e a capacidade de armazenamento por metro quadrado. Estes valores foram obtidos com base nos 35 eventos monitorados no período de junho de 2016 a janeiro de 2017.

### 4.2.1 Coeficiente de escoamento superficial

Para melhorar a visualização do comportamento de cada sistema, a Figura 20 relaciona os valores de coeficiente de escoamento obtidos nos eventos monitorados. Além disso, os resultados obtidos para cada tipo de cobertura nos eventos monitorados, juntamente com sua respectiva análise estatística descritiva (desvio padrão, média, e valores máximos e mínimos) são apresentados na Tabela 11. Os elevados desvios padrões observados para as coberturas verdes é devido à variabilidade comportamental das mesmas. Estudos semelhantes a este também reportaram valores consideráveis de desvio padrão (CASTRO, 2011; PESSOA, 2016).

**Figura 20 - Valores de coeficiente de escoamento obtidos para cada cobertura analisada nos eventos monitorados.**



**Tabela 11 – Características de cada evento monitorado e os respectivos valores de coeficientes de escoamento superficial obtidos para cada cobertura.**

<b>Evento</b>	<b>Dia</b>	<b>Altura pluviométrica (mm)</b>	<b>AMC</b>	<b>Classificação volume de chuva</b>	<b>Modular alta</b>	<b>Modular baixa</b>	<b>Contínua</b>	<b>Convencional</b>
1	16/06/16	14,70	I	Moderado	0,00	0,00	0,23	0,88
2	22/06/16	18,82	II	Moderado	0,00	0,00	0,79	0,90
3	14/07/16	80,25	I	Forte	0,00	0,64	0,86	0,95
4	15/07/16	34,75	III	Forte	0,00	0,90	0,90	0,98
5	03/08/16	2,08	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,91
6	07/08/16	10,18	I	Moderado	0,00	0,00	0,00	0,98
7	15/08/16	3,80	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,85
8	19/08/16	47,90	I	Forte	0,36	0,41	0,62	0,97
9	30/08/16	3,26	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,96
10	03/09/16	83,34	I	Forte	0,84	0,82	0,83	-
11	06/09/16	18,28	III	Moderado	0,94	0,97	0,97	0,98
12	18/09/16	4,25	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,90
13	03/10/16	6,92	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,85
14	06/10/16	15,74	I	Moderado	0,00	0,00	0,04	0,92
15	13/10/16	13,84	I	Moderado	0,00	0,00	0,49	0,95
16	16/10/16	20,14	II	Moderado	0,00	0,00	0,46	0,94
17	18/10/16	1,99	III	Leve	0,00	0,00	0,00	0,95
18	19/10/16	7,83	II	Leve	0,00	0,00	0,62	0,95
19	25/10/16	25,24	I	Moderado	0,44	0,82	0,69	0,94
20	09/11/16	3,30	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,90
21	15/11/16	15,38	I	Moderado	0,00	0,00	0,02	0,97
22	17/11/16	5,25	II	Leve	0,00	0,00	0,15	0,94
23	28/11/16	1,13	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,88
24	02/12/16	81,29	I	Forte	0,11	0,40	0,69	-

**Tabela 11 – Características de cada evento monitorado e os respectivos valores de coeficientes de escoamento superficial obtidos para cada cobertura (cont.).**

Evento	Dia	Altura pluviométrica (mm)	AMC	Classificação volume de chuva	Modular alta	Modular baixa	Contínua	Convencional
25	08/12/16	31,30	III	Forte	0,50	0,54	0,69	0,89
26	14/12/16	3,62	III	Leve	0,00	0,00	0,00	0,92
27	28/12/16	19,27	II	Moderado	0,68	0,82	0,68	0,90
28	31/12/17	8,05	II	Leve	0,29	0,50	0,79	0,90
29	05/01/17	8,10	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,91
30	08/01/17	18,31	I	Moderado	0,53	0,65	0,45	0,84
31	11/01/17	2,26	II	Leve	0,00	0,00	0,00	0,82
32	17/01/17	6,79	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,93
33	23/01/17	1,99	I	Leve	0,00	0,00	0,00	0,87
34	24/01/17	34,32	I	Forte	0,00	0,00	0,35	0,93
35	28/01/17	106,55	III	Forte	0,95	0,96	0,91	-
<b>Média</b>					0,16	0,24	0,35	0,92
<b>Desvio padrão</b>					0,30	0,36	0,36	0,04
<b>Valor mínimo</b>					0,00	0,00	0,00	0,82
<b>Valor máximo</b>					0,95	0,97	0,97	0,98

A partir da análise dos resultados, verifica-se que as coberturas verdes modulares foram capazes de reter todo o volume precipitado na maior parte dos eventos, principalmente a modular alta, que apresentou um coeficiente de escoamento médio igual a 0,16. Esta cobertura escoou em apenas dez dos trinta e cinco eventos monitorados, os quais foram caracterizados por apresentar elevada altura de precipitação e/ou elevada umidade antecedente. Destaca-se o seu comportamento no evento 24, em que a mesma foi capaz de reter mais de 90% do escoamento apesar da elevada precipitação pluviométrica observada nesta ocasião. Contudo, no mês de dezembro, em que ocorreram precipitações com maior frequência, verificou-se uma diminuição na capacidade de retenção desta cobertura,

sendo que dos dez eventos em que houve escoamento, quatro foram neste período.

A cobertura modular baixa apresentou um comportamento semelhante à cobertura modular alta, porém seu desempenho foi um pouco inferior, restando em média 8% a menos do escoamento pluvial. Seu coeficiente de escoamento superficial médio foi igual a 0,24. De fato, a capacidade de retenção especificada pela empresa Ecotelhado para esta cobertura é menor que para a modular alta. Com relação à cobertura verde contínua, percebeu-se que ela escoou na maioria dos eventos, contudo, comparando-se com a cobertura de fibrocimento, constatou-se que o volume escoado é inferior em todas as situações. Os valores de coeficiente de escoamento médio foram iguais a 0,35 e 0,92 para a cobertura contínua e para cobertura convencional, respectivamente. Em quase 50% dos eventos monitorados (5, 6, 7, 9, 12, 13, 17, 20, 23, 26, 29, 30, 31, 32, 33) as três coberturas verdes foram capazes de reter todo o volume de precipitação incidido em suas áreas de captação, ou seja, seus coeficientes de escoamento foram igual a 0 nestas situações. Por outro lado, nos eventos 11 e 35 elas comportaram-se como a cobertura convencional, com coeficientes de escoamento no intervalo de 0,91 a 0,97. Isto ocorreu devido à elevada umidade antecedente e precipitação pluviométrica destas ocasiões.

Destaca-se que no mês de dezembro até a primeira quinzena de janeiro, quando as chuvas foram mais frequentes, a cobertura verde modular baixa apresentou comportamento semelhante à cobertura verde contínua. Os coeficientes de escoamento médios obtidos neste período foram iguais 0,39 para a modular baixa e 0,42 para contínua. A cobertura modular alta diminuiu seu desempenho, contudo, ainda foi satisfatório, com um coeficiente de escoamento médio igual a 0,27.

No evento 30 observou-se um comportamento distinto do esperado nas coberturas verdes. Neste dia, verificou-se que as coberturas modulares apresentaram desempenho inferior ao da cobertura contínua. Isso pode ter ocorrido devido aos reservatórios destas coberturas estarem próximos da capacidade limite, visto que o mês anterior apresentou precipitações fortes e frequentes. De fato, a cobertura modular baixa, que possui uma capacidade de armazenamento menor que a cobertura modular alta, também apresentou coeficientes de escoamento maiores que o da cobertura contínua nos eventos 19 e 27. Com isso, infere-se que quando os reservatórios das coberturas modulares estão próximos da capacidade limite, estas coberturas apresentam capacidade de retenção menor que a cobertura contínua. Contudo, como a capacidade destes

reservatórios é elevada, na maioria dos eventos as coberturas modulares apresentaram comportamento superior ao da contínua.

A cobertura de fibrocimento apresentou um comportamento constante durante o período de monitoramento, apresentando coeficientes de escoamento entre 0,82 e 0,98. Nos eventos 10, 24 e 35 não foi possível determinar o coeficiente de escoamento desta cobertura, pois a precipitação pluviométrica foi muito elevada e o reservatório extravasou uma parcela do escoamento.

Por meio da aplicação do método estatístico não paramétrico de Mann-Whitney, com significância de 0,05, verificou-se que o coeficiente de escoamento superficial de todas as coberturas verdes foi significativamente menor que o da cobertura convencional. Este resultado era aguardado, visto que as coberturas verdes apresentaram elevado potencial de retenção do escoamento pluvial na maior parte dos eventos monitorados, indicando que este tipo de cobertura é uma alternativa importante com relação ao manejo de águas pluviais.

Comparando-se as coberturas verdes entre si, constatou-se que houve diferença significativa apenas entre a modular alta e a contínua. A utilização dos módulos de plástico com elevada capacidade de armazenamento de água na camada de drenagem permitiu que a cobertura modular conseguisse reter grandes quantidades de água antes de iniciar o escoamento. Destaca-se que mesmo apresentando coeficientes de escoamento mais elevados, a cobertura contínua também foi muito eficaz no controle do escoamento pluvial, conseguindo reter em média 65% da precipitação incidida.

Os valores encontrados nesta pesquisa são da mesma ordem de grandeza dos observados na literatura. No estudo de Jobim (2013), onde o autor avaliou diferentes tipos de coberturas verdes modulares, os valores de coeficiente de escoamento médio variaram de 0,13 a 0,44. No estudo de Tassi *et al.* (2014), os autores encontraram um coeficiente de escoamento médio igual a 0,38 para cobertura verde modular e 0,87 para cobertura convencional com telha de fibrocimento. Na mesma ordem de grandeza, os valores reportados por Pessoa (2016) são iguais a 0,83 para cobertura convencional e 0,43 para ambas as coberturas verdes analisadas no presente estudo. Com estes dados é possível confirmar o bom desempenho das coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento, mostrando-se uma alternativa eficiente para o manejo das águas pluviais.

Conforme visto na literatura, o volume da precipitação em cada evento influencia no controle do escoamento gerado pelas coberturas verdes. Deste modo, os valores de coeficiente de escoamento foram

agrupados de acordo com a altura pluviométrica de cada evento, como descrito no método. Estes intervalos foram utilizados de modo a permitir um bom conjunto de dados em cada classe. A Tabela 12 apresenta os valores médios, mínimos e máximos obtidos para cada cobertura em eventos leves, moderados e fortes.

**Tabela 12 - Valores mínimos, máximos e médios de coeficiente de escoamento superficial para cada sistema em eventos leves, moderados e fortes.**

Coeficiente de escoamento	Classificação do Evento								
	Leve			Moderado			Forte		
	Modular alta	Modular baixa	Contínua	Modular alta	Modular baixa	Contínua	Modular alta	Modular baixa	Contínua
Mín.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
Máx.	0,29	0,50	0,79	0,94	0,97	0,97	0,95	0,96	0,91
Méd.	0,02	0,03	0,10	0,24	0,30	0,44	0,34	0,58	0,73
Desvio padrão	0,07	0,12	0,24	0,35	0,42	0,33	0,39	0,32	0,19
Nº eventos	16			11			8		

Percebe-se a influência do volume precipitado no desempenho das coberturas verdes. Existe uma relação crescente entre a altura da precipitação pluviométrica e o valor médio do coeficiente de escoamento superficial para todas as coberturas. É possível verificar o bom desempenho das coberturas verdes em eventos leves, principalmente as modulares, as quais foram capazes de reter quase 100% da precipitação incidida sobre elas. O coeficiente de escoamento médio foi igual a 0,02 para modular alta e 0,03 para modular baixa. A cobertura verde contínua não foi capaz de reter todo o volume precipitado somente nos eventos 18, 22 e 28, onde apresentou coeficiente de escoamento igual a 0,62, 0,15 e 0,79, respectivamente. É importante destacar que sua condição de umidade antecedente para os três eventos estava na classe AMC II, com 19,08mm de chuva acumulada no primeiro, 15,38mm no segundo e 20,70mm no terceiro, ou seja, a saturação do substrato estava elevada, contribuindo para menor eficiência de retenção da cobertura. O evento 28 foi o único em que as coberturas modulares apresentaram escoamento, sendo a altura pluviométrica neste dia igual a 8,05mm.

Nos eventos moderados, as coberturas verdes modulares também mostraram desempenho satisfatório na retenção do escoamento pluvial, sendo que elas foram capazes de reter todo o volume precipitado em quatro dos onze eventos monitorados. As ocasiões em que ocorreu escoamento foram caracterizadas por terem maiores alturas pluviométricas e/ou elevada umidade antecedente. A situação crítica ocorreu no evento 11, que apresentou uma altura pluviométrica igual a 18,28mm. Neste dia elas apresentaram comportamento semelhante à cobertura convencional, apresentando coeficiente de escoamento maior que 0,90. Isto ocorreu devido ao sistema de armazenamento destas coberturas estarem completamente cheios, fato este decorrente da elevada altura pluviométrica acumulada nos cinco dias anteriores ao evento, que era igual a 105,90mm. Quanto à cobertura verde contínua, observou-se que a mesma apresentou escoamento em quase todos os eventos, contudo, o volume escoado não foi elevado, apresentando um coeficiente de escoamento superficial médio igual a 0,44. Do mesmo modo que as coberturas verdes modulares, este sistema também não foi eficiente no controle do escoamento no evento 11.

Nos eventos fortes houve uma diminuição da eficácia das coberturas verdes em controlar o escoamento pluvial, principalmente na contínua, a qual apresentou coeficiente de escoamento superficial médio igual a 0,73 nestas condições. Isto ocorre devido ao fato que no decorrer da precipitação a capacidade de retenção do sistema vai diminuindo conforme o grau de saturação aumenta. Ou seja, quando o substrato está na condição seca ele consegue reter grande parte do volume de chuva incidido, contudo quando ele atinge seu ponto de saturação, o sistema passa a escoar rapidamente, não sendo mais capaz de armazenar água em suas camadas. É importante destacar, que mesmo nestes eventos com elevada altura pluviométrica, as coberturas verdes modulares apresentaram bom desempenho, sendo que a modular alta conseguiu amortecer todo volume precipitado em algumas situações (eventos 3, 4 e 34). No evento 24, onde a altura pluviométrica foi igual a 81,29mm o coeficiente de escoamento desta cobertura foi igual a 0,11, ou seja, 89% da precipitação incidida ficou armazenada no interior do sistema. Os coeficientes de escoamento médio obtidos nos eventos fortes foram iguais a 0,34 para a cobertura modular alta e 0,58 para a cobertura verde modular baixa. Esta elevada eficácia ocorre devido à camada de drenagem destes sistemas funcionarem como um reservatório, conseguindo armazenar grande quantidade de água. No caso das coberturas modulares, mesmo quando o substrato atinge o ponto de saturação, o sistema só começa a



escoar quando a capacidade de armazenamento da camada de drenagem também for superada.

Estes resultados são condizentes com os estudos revisados. Carter e Rasmussen (2006) perceberam uma relação inversamente proporcional entre o volume da precipitação e a capacidade de retenção da cobertura verde modular analisada. A cobertura verde do estudo de Lee *et al.* (2013) apresentou coeficiente de escoamento igual a 0 em uma precipitação com altura pluviométrica de 10mm com três dias de antecedente seco. Para a mesma situação, porém para precipitação pluviométrica igual a 50mm, o valor do coeficiente de escoamento variou entre 0,44 e 0,50. Em eventos fortes, com altura pluviométrica maior que 90mm, a cobertura verde analisada por Rossato *et al.* (2015) foi capaz de reter de 11 a 22% do escoamento. Este resultado é semelhante ao encontrado para cobertura verde contínua em eventos fortes, cujo valor médio do coeficiente de escoamento foi igual a 0,78, ou seja, 22% do volume precipitado ficou retido no seu sistema. A mesma relação entre a altura pluviométrica da precipitação e a capacidade de retenção das coberturas verdes foi observada nos estudos de Getter, Rowe e Andresen (2007), Teemusk e Mander (2007), Wong e Jim (2014) e Zhang *et al.* (2015).

Além do volume de chuva precipitado no evento, é importante observar a condição de umidade antecedente do sistema. Um evento leve pode gerar escoamento devido às características anteriores a ele, como observado para a cobertura verde contínua no evento 28, em que uma precipitação com altura pluviométrica de 8,05mm gerou um coeficiente de escoamento igual a 0,79. Nesta ocasião o volume acumulado nos cinco dias anteriores era igual a 20,07mm. Em contrapartida, no evento 1, em que a altura pluviométrica do evento foi igual a 14,70mm e o substrato da cobertura encontrava-se seco, o coeficiente de escoamento foi igual a 0,23.

Deste modo, levando-se em consideração a influência da condição de saturação das coberturas verdes no seu desempenho em controlar o escoamento pluvial, os valores de coeficiente de escoamento superficial de cada sistema foram agrupados de acordo com a classificação do evento, considerando-se as diferentes condições de umidade antecedente. A Tabela 13 apresenta os valores médios, máximos e mínimos obtidos em cada classe.

**Tabela 13 – Valores mínimos, máximos e médios de coeficiente de escoamento superficial para cada sistema em eventos com diferentes condições de umidade.**

Coeficiente de escoamento	Classificação do evento								
	AMC I			AMC II			AMC III		
	Modular alta	Modular baixa	Contínua	Modular alta	Modular baixa	Contínua	Modular alta	Modular baixa	Contínua
Mín.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máx.	0,84	0,82	0,86	0,68	0,82	0,79	0,95	0,97	0,97
Méd.	0,10	0,17	0,24	0,14	0,19	0,50	0,40	0,56	0,58
Nº de eventos	22			7			6		

Por fim, destaca-se que a interrelação entre o volume precipitado e a condição de umidade antecedente mostrou-se determinante em algumas situações. Nos eventos 17 e 26, a condição de umidade antecedente encontrava-se igual à AMC III, com um volume acumulado de 30,78mm e 27,90mm, respectivamente. Contudo, como a precipitação foi leve, com uma altura pluviométrica de 1,99mm no primeiro evento e 3,62mm no segundo, as coberturas verdes foram capazes de reter todo escoamento pluvial, apresentando coeficiente de escoamento igual a 0. O contrário foi observado no evento 3, onde mesmo o volume acumulado nos cinco dias anteriores ter sido igual a 0, ou seja, condição de umidade antecedente igual a AMC I, a cobertura verde modular baixa e a cobertura verde contínua apresentaram coeficientes de escoamento iguais a 0,64 e 0,84, respectivamente. Isto decorreu devido à elevada altura pluviométrica observada nesta ocasião, que foi igual a 80,25mm. Comportamento semelhante a este também foi observado no evento 10.

#### **4.2.2 Capacidade de armazenamento por unidade de área**

A Tabela 14 apresenta a capacidade de armazenamento de água por unidade de área de cada cobertura nos eventos monitorados

**Tabela 14 - Capacidade de armazenamento por unidade de área de cada sistema em cada evento.**

Evento	AMC	Altura pluviométrica (mm)	Escoamento (L)			Capacidade de retenção (L/m²)		
			Modular alta	Modular baixa	Contínua	Modular alta	Modular baixa	Contínua
1	I	14,70	0,00	0,00	3,37	14,70	14,70	11,26
2	II	18,82	0,00	0,00	14,63	18,82	18,82	3,90
3	I	80,25	0,00	49,24	67,32	80,25	28,98	11,56
4	III	34,75	0,00	30,08	30,70	34,75	3,43	3,42
5	I	2,08	0,00	0,00	0,00	2,08	2,08	2,08
6	I	10,18	0,00	0,00	0,00	10,18	10,18	10,18
7	I	3,80	0,00	0,00	0,00	3,80	3,80	3,80
8	I	47,90	16,76	18,88	29,15	30,45	28,24	18,16
9	I	3,26	0,00	0,00	0,00	3,26	3,26	3,26
10	I	83,34	66,84	65,36	67,54	13,74	15,29	14,42
11	III	18,28	16,55	16,96	17,42	1,05	0,62	0,50
12	I	4,25	0,00	0,00	0,00	4,25	4,25	4,25
13	I	6,92	0,00	0,00	0,00	6,92	6,92	6,92
14	I	15,74	0,00	0,00	0,57	15,74	15,74	15,16
15	I	13,84	0,00	0,00	6,70	13,84	13,84	7,00
16	II	20,14	0,00	0,00	9,10	20,14	20,14	10,85
17	III	1,99	0,00	0,00	0,00	1,99	1,99	1,99
18	II	7,83	0,00	0,00	4,73	7,83	7,83	3,00
19	I	25,24	10,72	19,92	16,99	14,08	4,50	7,90
20	I	3,30	0,00	0,00	0,00	3,30	3,30	3,30
21	I	15,38	0,00	0,00	0,31	15,38	15,38	15,06
22	II	5,25	0,00	0,00	0,75	5,25	5,25	4,48
23	I	1,13	0,00	0,00	0,00	1,13	1,13	1,13
24	I	81,29	8,37	31,40	54,65	72,57	48,60	25,52
25	III	31,30	15,16	16,34	21,25	15,51	14,29	9,62

**. Tabela 14 - Capacidade de armazenamento por unidade de área de cada sistema em cada evento (cont.).**

Evento	AMC	Altura pluviométrica (mm)	Escoamento (L)			Capacidade de retenção (L/m²)		
			Modular alta	Modular baixa	Contínua	Modular alta	Modular baixa	Contínua
26	III	3,62	0,00	0,00	0,00	3,62	3,62	3,62
27	II	19,27	12,60	15,14	12,80	6,15	3,51	6,21
28	II	8,05	2,26	3,85	6,20	5,70	4,04	1,72
29	I	8,10	0,00	0,00	0,00	8,10	8,10	8,10
30	I	18,31	9,35	11,50	8,07	8,57	6,34	10,08
31	II	2,26	0,00	0,00	0,00	2,26	2,26	2,26
32	I	6,79	0,00	0,00	0,00	6,79	6,79	6,79
33	I	1,99	0,00	0,00	0,00	1,99	1,99	1,99
34	I	34,32	0,00	0,00	11,85	34,32	34,32	22,23
35	III	106,55	97,10	98,20	95,41	5,45	4,30	9,19
<b>Média</b>						<b>14,11</b>	<b>10,51</b>	<b>7,74</b>

Percebe-se que a modular alta apresentou elevada eficiência em reter o escoamento pluvial em seu sistema, conseguindo armazenar até 80,25 L/m² em apenas um evento de precipitação. No manual de especificação está descrito que ela é capaz de reter um volume de até 160,00 L/m². De fato, verifica-se que houve escoamento nesta cobertura somente a partir do evento 8. Somando-se os volumes anteriormente armazenados, encontra-se uma capacidade de armazenamento total igual a 164,58 L/m². Considerando-se que parte deste volume foi evaporado e absorvido pelas raízes da vegetação observou-se uma capacidade de armazenamento máxima semelhante ao especificado pela empresa Ecotelhado.

Realizando-se a mesma análise para a cobertura verde modular baixa, verifica-se que a mesma conseguiu reter um volume máximo igual a 70,71L/m² entre os eventos 12 e 18, em que não apresentou escoamento. A empresa Ecotelhado especifica que esta cobertura é capaz de armazenar até 60,00L/m². Ou seja, novamente, considerando-se que parte deste volume tenha sido evaporado e utilizado pelas plantas, obteve-se um valor

experimental de volume máximo armazenado semelhante ao fornecido no manual de especificação.

A cobertura verde contínua apresentou uma capacidade de armazenamento um pouco inferior aos outros dois sistemas. O valor máximo observado para este sistema foi igual a 25,52L/m<sup>2</sup> no evento 24, em que o volume precipitado foi igual a 81,29mm e a condição de umidade antecedente igual a AMC I.

A retenção média por unidade de área encontrada para as coberturas verdes foi igual a 14,11 L/m<sup>2</sup> para modular alta, 10,51L/m<sup>2</sup> para modular baixa e 7,74L/m<sup>2</sup> para contínua. Valores semelhantes a estes foram reportados por Jobim (2013), que encontrou para diferentes tipos de coberturas verdes modulares retenções médias no intervalo de 7,60 a 14,20L/m<sup>2</sup>, dependendo do tipo de módulo utilizado e da presença de argila expandida. Do mesmo modo, a cobertura modular analisada por Tassi *et al.* (2014) apresentou capacidade de retenção média igual a 12,00 L/m<sup>2</sup>.

#### 4.3 ANÁLISE QUALITATIVA

Foram realizadas coletas de amostras do escoamento de todas as coberturas sempre que o volume escoado fosse suficiente para execução dos testes. Para comparação de resultados, a água da chuva também foi coletada. Ativos testes estavam em falta.

**Tabela 15** apresenta os eventos monitorados na pesquisa, sua correspondente altura pluviométrica e condição de umidade antecedente, e quais as coberturas que foi possível realizar a análise físico-química da água.

Devido à elevada capacidade de retenção das coberturas verdes, foi possível realizar a análise qualitativa da água somente nos eventos em que houve escoamento nestes sistemas, sendo equivalente a oito eventos para a cobertura modular alta, dez eventos para a cobertura modular baixa e dezenove eventos para a cobertura contínua. Para cobertura convencional e para água coletada diretamente da atmosfera foram executados os testes de qualidade da água em trinta e dois eventos monitorados.

Os parâmetros referentes ao pH, cor aparente, turbidez, oxigênio dissolvido, ferro, fósforo, nitrito e amônia foram determinados em todas as coletas realizadas. Para os parâmetros referentes ao nitrato e ao fosfato, as análises foram realizadas a partir do evento 8, pois no período anterior a este evento os reagentes necessários para execução dos respectivos testes estavam em falta.

**Tabela 15 - Eventos monitorados para realização da análise qualitativa.**

<b>Evento</b>	<b>Altura pluviométrica (mm)</b>	<b>AMC</b>	<b>Modular alta</b>	<b>Modular baixa</b>	<b>Contínua</b>	<b>Convencional</b>	<b>Água da chuva</b>
1	14,7	I			x	x	x
2	18,82	II			x	x	x
3	80,25	I		x	x	x	x
4	34,75	III		x	x	x	x
5	2,08	I				x	x
6	10,18	I				x	x
7	3,8	I				x	x
8	47,9	I	x	x	x	x	x
9	3,26	I				x	x
10	83,34	I	x	x	x	x	x
11	18,28	III	x	x	x	x	x
12	4,25	I				x	x
13	6,92	I				x	x
14	15,74	I			x	x	x
15	13,84	I			x	x	x
16	20,14	II			x	x	x
17	1,99	III				x	x
18	7,83	II			x	x	x
19	25,24	I	x	x	x	x	x
20	3,3	I				x	x
21	15,38	I			x	x	x
22	5,25	II			x	x	x
23	1,13	I				x	x
24	81,29	I	x	x	x	x	x
25	31,3	III	x	x	x	x	x
26	3,62	III				x	x
27	19,27	II					
28	8,05	II					
29	8,1	I				x	x

A análise dos parâmetros microbiológicos, referentes à quantidade de coliformes totais e termotolerantes, foi realizada em apenas um evento

de precipitação. Isto ocorreu devido ao custo para execução deste teste. Como a NBR 15.527 exige apenas verificação semestral destes parâmetros, considerou-se o teste feito suficiente para comparação de resultados.

Como descrito no capítulo 3, os resultados dos parâmetros físico-químicos analisados serão apresentados em forma de gráfico do tipo “*boxplot*”. Também serão discutidos e comparados com os estudos revisados no referencial bibliográfico. A estatística descritiva e os resultados dos testes de normalidade e comparação de médias encontram-se nos apêndices A e B, respectivamente.

### 4.3.1 pH

A Figura 21 apresenta o gráfico *boxplot* dos valores de pH obtidos no período de monitoramento para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva coletada diretamente da atmosfera.

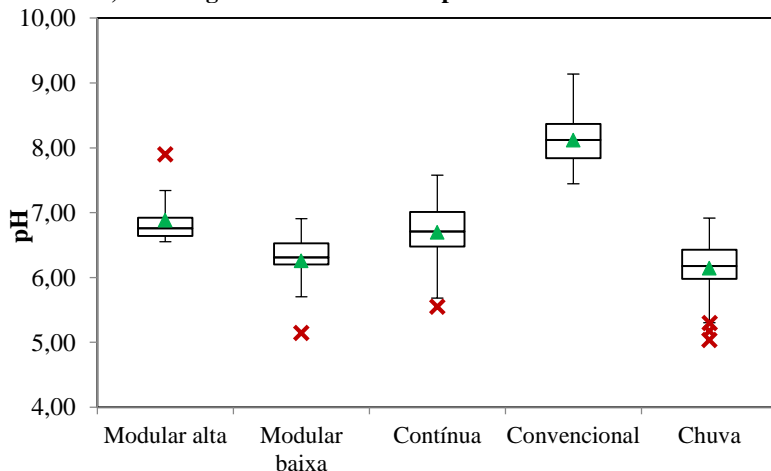
Os valores de pH obtidos para as amostras coletadas diretamente da atmosfera ficaram no intervalo de valores entre 5,31 e 7,11, com média igual a 6,15. Ou seja, a água da chuva apresentou caráter ácido, sendo que em um dos eventos, o pH ficou abaixo do limite inferior do intervalo, com um valor de 5,04. Esta acidez ocorre, principalmente, devido à presença de gases como o CO<sub>2</sub> e o SO<sub>4</sub> na atmosfera. Estes gases reagem com a água da chuva, formando ácidos que, consequentemente, diminuem o valor do seu pH.

A passagem da água da chuva pelas coberturas analisadas fez com que ocorresse aumento de seu pH, principalmente na cobertura de fibrocimento, a qual apresentou valores de pH no intervalo de 7,05 a 9,17, mostrando um elevado potencial de neutralização da acidez da água. Este aumento não foi expressivo nas coberturas verdes, as quais apresentaram mais de 50% dos valores de pH menores do que 7,00. Os valores médios de pH encontrados para a cobertura verde modular alta, para a cobertura verde modular baixa e para cobertura verde contínua foram, respectivamente, iguais a 6,89, 6,26 e 6,70.

Com a aplicação do teste de comparação de médias, verificou-se que apenas a cobertura verde modular baixa não elevou significativamente o valor do pH da água da chuva. As demais coberturas analisadas apresentaram valor médio significativamente maior do que o obtido para água coletada diretamente da atmosfera. Comparando-se as coberturas verdes entre si, observou-se valores de pH semelhantes para a modular alta e para a contínua. A presença de argila expandida nestas

duas coberturas pode ter contribuído para diminuição da acidez da água da chuva.

**Figura 21 - Valores de pH encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior, os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



Com estes dados, infere-se que com exceção da cobertura verde modular baixa, as demais coberturas mostraram um significativo potencial de neutralização da água da chuva, principalmente a convencional, que apresentou os maiores valores. Os resultados deste estudo são comparáveis com os obtidos por Berndtsson *et al.* (2009) e por Beecham e Razzaghmanesh (2015). No primeiro, o pH encontrado para uma cobertura verde extensiva instalada na Suécia ficou na faixa de 5,80 a 6,50, com valor médio igual a 6,20. No segundo, realizado na Austrália, os autores observaram valores médios no intervalo de 6,70 a 6,98, dependendo tipo de cobertura verde analisado.

A NBR 15.587, que discorre sobre os requisitos de aproveitamento da água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis, recomenda que os valores de pH estejam no intervalo entre 6,00 e 8,00. Nestas condições, apenas a cobertura verde modular alta conseguiu atender a condição imposta pela norma, pois apresentou valores de pH no intervalo de 6,55 a 7,90. Tanto a cobertura verde modular baixa quanto a cobertura verde contínua apresentaram valores de pH menores que 6,00 em alguns eventos monitorados. A cobertura de fibrocimento não atendeu



aos requisitos, pois apresentou valores de pH acima do limite superior estipulado pela norma.

Para que a água seja utilizada para fins de irrigação, a documentação da EMBRAPA recomenda que os valores de pH estejam no intervalo de 6,00 a 8,50. Novamente, apenas a cobertura verde modular alta apresentou valores que atenderam aos requisitos estipulados.

Na publicação da CONAMA é descrito que os valores de pH devem ficar no intervalo de 6,00 a 9,00 para águas destinadas a todas as classes consideradas. Na publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações” esta faixa também é permitida para os usos destinados às classes 1, 2 e 3. Nestas situações, verifica-se que além do escoamento da cobertura verde modular alta, o escoamento da cobertura convencional também apresentou valores dentro do limite imposto.

#### **4.3.2 Cor aparente**

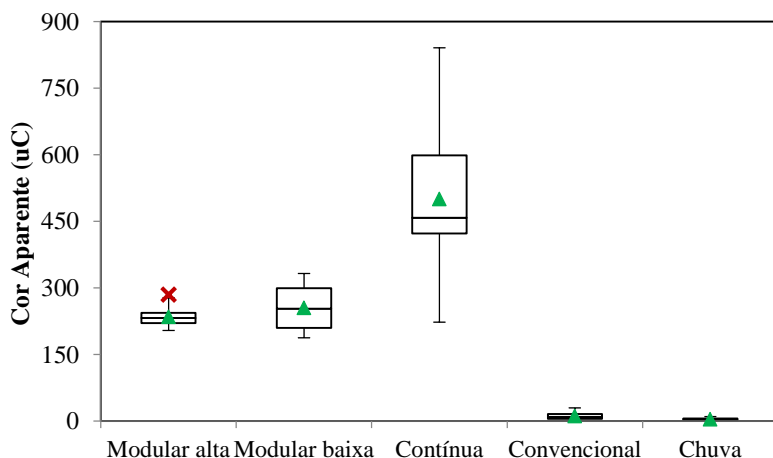
Os valores de cor aparente obtidos durante o monitoramento estão indicados na Figura 22.

A água da chuva coletada diretamente da atmosfera apresentou valores na faixa de 0 a 10 uC, com uma cor aparente média igual a 4 uC. Percebeu-se que as coberturas verdes conferiram cor a esta água, visto que a concentração deste parâmetro aumentou significativamente após a passagem da água por elas. O escoamento destas coberturas apresentou cor amarelada. A cobertura de fibrocimento também elevou os níveis de cor aparente da água da chuva, porém este aumento foi menos expressivo, sendo a cor aparente média obtida para este sistema igual a 14 uC.

A maior variabilidade de resultados bem como os maiores valores observados foram obtidos das amostras coletadas da cobertura verde contínua. Os limites superior e inferior foram, respectivamente, iguais a 841 uC e 223 uC, sendo a cor aparente média igual a 500 uC. Considerando o grau de significância adotado, verificou-se que a cor aparente da cobertura verde contínua foi significativamente maior que a cor aparente das coberturas verdes modulares, as quais apresentaram valores médios igual a 235 uC para a modular alta e 255 uC para a modular baixa, não apresentando diferenças significativas quando comparadas entre si. Isto é justificado devido à maior espessura da camada de substrato da cobertura verde contínua, o que ocasionou maior carregamento de partículas de solo e maior teor de matéria orgânica. Outro fator que pode ter contribuído para os menores valores de cor aparente observados no escoamento das coberturas verdes modulares corresponde à posição do dreno, localizado na lateral das bancadas destas coberturas.

Como a camada de drenagem funcionou como um reservatório, a água armazenada passou pelo processo de sedimentação, fazendo com que partículas de solo ficassem depositadas no fundo da caixa, melhorando a qualidade da água escoada. Além disso, o tipo de filtro utilizado, que nas coberturas modulares correspondeu a uma manta de absorção fornecida pela empresa Ecotelhado, e na cobertura contínua a uma manta geotêxtil Bidim, também pode ter ocasionado alguma interferência na quantidade de partículas de solo que passou para a camada de drenagem.

**Figura 22 - Valores de cor aparente encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior, os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



É importante destacar que se observou uma variação no comportamento da cor aparente da água escoada pela cobertura verde contínua com o decorrer dos meses. As quatro primeiras coletas apresentaram valores entre 737 e 841 uC. A partir do mês de agosto o intervalo diminuiu para a faixa de 340 a 499 uC, indicando que tenha ocorrido estabilização da camada de substrato. Contudo, a partir do mês de dezembro, os valores de cor aparente aumentaram novamente, subindo para o intervalo entre 450 e 593 uC. Este aumento pode ser justificado devido à vegetação ter secado neste período, sendo que em pequenas áreas observou-se que parte da grama morreu. Isso ocasionou uma desestabilização no substrato e, com isso, maior carreamento de partículas no escoamento.

Este aumento na coloração da água da chuva ao passar por coberturas verdes também foi reportado em outros estudos. Na pesquisa de Teixeira (2013), onde foram analisadas oito configurações distintas de coberturas verdes na cidade de Campinas-SP, os resultados para todos os sistemas foram elevados, com a maior parte dos valores no intervalo de 250 a 500 uC. A autora também avaliou a água escoada por uma cobertura de fibrocimento, sendo a cor aparente média obtida igual a 18 uC, valor semelhante ao encontrado nesta pesquisa. Em Santa Maria-RS, os valores de cor aparente média obtidos por Pessoa (2016) para duas coberturas verdes modulares foram similares aos encontrados para as coberturas modulares aqui analisadas, sendo iguais a 275 uC e 317 uC.

A NBR 15.587 exige análise mensal deste parâmetro e determina que os valores não excedam o limite de 15 uC. Deste modo, infere-se que apenas a cobertura de fibrocimento foi capaz de atender a norma em alguns eventos de precipitação, apresentando cor aparente média inferior ao valor estabelecido. Porém, durante o monitoramento também se observou valores superiores a 15 uC, não satisfazendo aos requisitos para uso não potável.

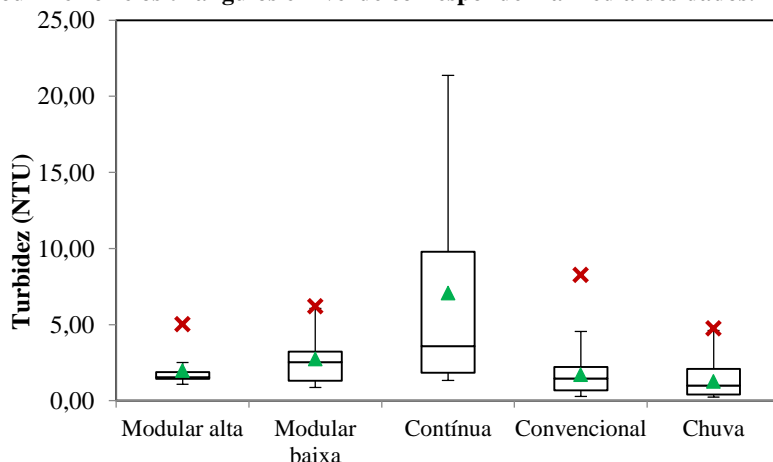
Os valores obtidos na cobertura convencional atendem somente aos usos destinados à classe 3 da publicação “Conservação e Reuso de Águas nas Edificações”, que prescreve que a cor aparente da água não seja superior a 30 uC, podendo ser utilizada para irrigação de áreas verdes e jardins.

### 4.3.3 Turbidez

O gráfico *boxplot* com os resultados obtidos para o parâmetro turbidez durante o período de monitoramento está apresentado na Figura 23.

A água coletada diretamente da atmosfera apresentou valores no intervalo de 0,230 a 4,740 NTU, com uma média igual a 1,260 NTU. Valores semelhantes a este foram reportados por outros estudos, como no de Teixeira (2013), em que a turbidez média da água da chuva foi igual a 1,400 NTU. Nesta mesma ordem de valores, Blis *et al.* (2009) encontraram uma turbidez média igual a 1,300 NTU.

**Figura 23 - Valores de turbidez encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



Embora a água coletada diretamente da atmosfera tenha se mostrado menos turva, após a análise estatística, verificou-se que a cobertura convencional e que a cobertura verde modular alta não aumentaram significativamente os níveis de turbidez da água da chuva, apresentando média igual a 1,705 NTU e 1,974 NTU, respectivamente. Com relação à cobertura convencional, observou-se um elevado valor de turbidez no dia 14/07/2016, igual a 8,267 NTU. Isto pode ter ocorrido devido à ocorrência de maior acúmulo de poeira ou outros detritos na superfície da telha, visto que este evento foi precedido por um período anterior extremamente seco.

Destaca-se o comportamento da cobertura verde modular alta em relação a este parâmetro. Mesmo utilizando substrato em sua composição, seus níveis de turbidez foram semelhantes aos obtidos para a água da chuva e para a cobertura convencional. As coberturas verdes modulares não apresentaram diferenças significativas quando comparadas entre si. Contudo, os níveis de turbidez obtidos para a modular baixa foram significativamente maiores que os da água da chuva e que os da cobertura convencional, mostrando um desempenho inferior ao da modular alta. A turbidez média desta cobertura foi igual a 2,728 NTU.

Os maiores níveis de turbidez bem como a maior variabilidade de resultados foram obtidos na cobertura verde contínua, que apresentou

média igual a 7,053 NTU. Como mencionado anteriormente, a maior quantidade de substrato utilizado, a posição do dreno no fundo da caixa e o tipo de filtro utilizado nesta cobertura podem ser os fatores que ocasionaram maior quantidade de sólidos em seu escoamento.

Destaca-se que na cobertura verde contínua, durante as quatro primeiras coletas as amostras apresentaram-se muito turvas, com valores na faixa de 16,667 a 21,367 NTU. Após este período, os níveis de turbidez obtidos foram menores que 7,303 NTU, sendo a maior parte no intervalo entre 2,000 e 3,000 NTU. Contudo, nas duas últimas coletas realizadas no mês de janeiro, os valores de turbidez aumentaram novamente, sendo iguais a 8,437 e 9,793 NTU. Esta variação nos resultados foi semelhante ao observado para cor aparente. Como descrito anteriormente, o período sem precipitação e as elevadas temperaturas fez com que a vegetação secasse, sendo que uma pequena parte não resistiu. Isto pode ter ocasionado desestabilização da camada de substrato, fator este que provocou maior carreamento de partículas no escoamento, aumentando sua turbidez.

A diminuição da turbidez com o aumento da idade da cobertura verde é relatada em alguns trabalhos revisados na literatura. No estudo de Teixeira (2013), as oito configurações de coberturas verdes analisadas apresentaram redução na turbidez quando comparados os dois períodos de coleta em que a autora avaliou este parâmetro. Em Santa Maria-RS, os valores reportados por Pessoa (2016) mostraram níveis mais elevados de turbidez para a cobertura verde com menor tempo de instalação. O autor também explica esta variação nos resultados devido a diferenças na quantidade de argila presente no substrato dos dois sistemas analisados. Solos mais argilosos tendem a liberar maior quantidade de partículas no escoamento. Caso a vegetação da cobertura verde contínua não tivesse secado, os resultados de turbidez poderiam ter continuado a decrescer, contudo, um maior período de observação é necessário para comprovar este fato.

É importante destacar que para as coberturas verdes percebeu-se um aumento da turbidez com o aumento do volume precipitado. A justificativa para este fato decorre que precipitações com maior volume tendem a carregar maior quantidade de partículas de solo para o escoamento, causando aumento na turbidez da água. Esta relação entre a turbidez e a altura pluviométrica também foi reportada no trabalho de Budel (2014).

Comparando-se com os padrões de água definidos pela NBR 15.587, nenhuma das coberturas analisadas atendeu ao limite imposto para usos menos restritivos, que determina que a turbidez deva ser menor

que 5,000 NTU. Contudo, para as coberturas verdes modulares e para a cobertura de fibrocimento, este valor foi excedido em apenas um evento de precipitação, sendo os valores de turbidez iguais a 5,023, 6,200 e 8,267 NTU para a modular alta, modular baixa e convencional, respectivamente. Ressalta-se que com exceção deste evento, a cobertura verde modular alta atendeu ao requisito para usos mais nobres, que estipula que a turbidez deva ser menor que 2 NTU.

Por outro lado, o escoamento de todas as coberturas analisadas atendeu aos requisitos impostos para água doce na publicação da CONAMA, a qual impõe um limite de 40 NTU para águas destinadas aos usos da classe 1 e 100 NTU para águas destinadas aos usos das classes 2 e 3. Além disso, considerando-se o preconizado pela NBR 13.969, verifica-se que o escoamento das coberturas atendeu ao limite de turbidez imposto para águas destinadas aos usos da classe 3, correspondente a descarga de vasos sanitários.

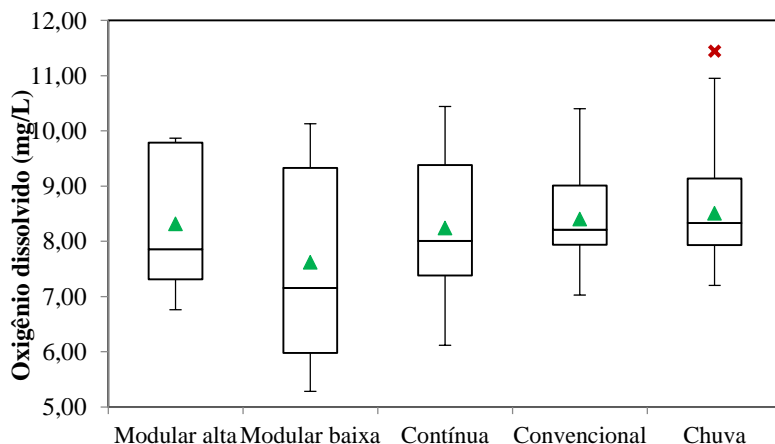
#### **4.3.4 Oxigênio dissolvido**

Na Figura 24 estão apresentados os resultados obtidos para a concentração de oxigênio dissolvido de cada cobertura e da água da chuva coletada diretamente da atmosfera.

Percebe-se que a concentração de oxigênio dissolvido na água escoada pelas coberturas analisadas e na água coletada diretamente da atmosfera apresentou pouca variabilidade. Os valores médios de oxigênio dissolvido foram iguais a 8,32 mg/L para a cobertura verde modular alta, 7,62 mg/L para a cobertura verde modular baixa, 8,24 mg/L para a cobertura verde contínua, 8,40 mg/L para a cobertura de fibrocimento e 8,51 mg/L para a água da chuva. Os resultados foram semelhantes entre as amostras, não apresentando diferenças significativas quando comparados entre si. Além disto, a passagem da água pelas coberturas não ocasionou poluição da água, a qual é indicada quando ocorrem baixas concentrações deste parâmetro.

Destaca-se que a partir do mês de dezembro observou-se diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido, tanto para a água escoada pelas coberturas quanto para a água da chuva. Isto pode ser explicado devido ao aumento de temperatura ocorrido neste período. Segundo Fiorucci e Benedetti (2005), este parâmetro é fortemente influenciado pela temperatura, sendo que quanto mais elevada, menor é a quantidade de oxigênio dissolvido.

**Figura 24-Valores da concentração de oxigênio dissolvido encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



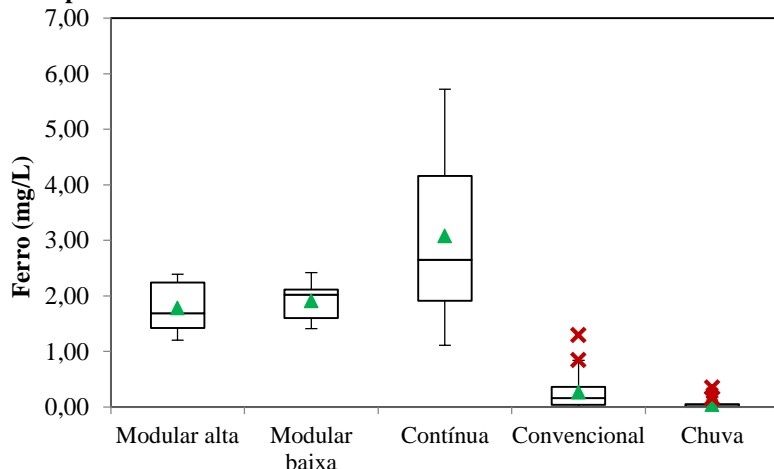
Os valores obtidos são semelhantes aos reportados por Jobim (2014), o qual obteve concentrações de oxigênio dissolvido da faixa de 6,00 a 14,00 mg/L, tanto para a cobertura verde e para a cobertura convencional quanto para a água coletada diretamente da atmosfera.

Comparando-se os resultados obtidos com os requisitos impostos na publicação do CONAMA, verifica-se que todas as coberturas atenderam aos limites especificados para águas destinadas aos usos das classes 2 e 3. Apenas a cobertura verde modular baixa não atendeu aos requisitos da classe 1, que exige concentração de oxigênio dissolvido maior que 6mg/L. Para as classes 2 e 3 as concentrações devem ser maiores que 5 e 4mg/L, respectivamente.

#### 4.3.5 Ferro

Os resultados obtidos para a concentração de ferro no escoamento das coberturas analisadas e na água coletada diretamente da atmosfera estão apresentados na Figura 25.

**Figura 25- Valores da concentração de ferro (Fe) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



A concentração de ferro da água da chuva apresentou valores na faixa de 0,00 a 0,35 mg/L, com média igual a 0,05 mg/L. Este valor é semelhante ao reportado por Berndtsson *et al.* (2009), que encontrou uma concentração média de ferro igual a 0,065 mg/L para amostra de chuva coletada na Suécia e 0,080 mg/L para amostra de chuva coletada no Japão. Do mesmo modo, o resultado de Gnecco *et al.* (2013) foi igual a 0,088 mg/L para água da chuva coletada na Itália.

A cobertura de fibrocimento apresentou valores entre 0,00 e 1,30 mg/L, com média igual a 0,27 mg/L. Após análise estatística verificou-se que esta cobertura agiu como fonte de ferro, visto que seus resultados foram significativamente mais elevados do que os obtidos na água da chuva. Os valores reportados na literatura para coberturas convencionais são menores do que os que foram observados no presente estudo. A deposição de algum material na superfície de captação pode ter causado a ocorrência deste parâmetro no escoamento.

Quanto às coberturas verdes, verificou-se que todos os sistemas analisados comportaram-se como fonte de ferro, apresentando concentrações significativamente maiores que a água da chuva e também que a cobertura convencional. Isto era esperado, visto que a principal



causa deste parâmetro nas águas é sua passagem pelo solo (VON SPERLING, 1995). A cobertura verde contínua apresentou os piores resultados, com concentrações no intervalo de 1,11 a 5,72 mg/L e média igual a 3,08 mg/L. Isto pode ser justificado pela maior espessura do substrato deste sistema, fator que ocasionou maior liberação deste parâmetro na água escoada. As concentrações de ferro obtidas no escoamento das coberturas verdes modulares não apresentaram diferenças significativas entre si, mostrando um comportamento semelhante na liberação deste parâmetro. A média e o maior valor observado foram, respectivamente, iguais a 1,78 mg/L e 2,39 mg/L para a cobertura verde modular alta e iguais a 1,91 mg/L e 2,42 mg/L para a cobertura verde modular baixa. Os resultados destes sistemas são comparáveis ao reportado por Farias (2012). Nesse estudo, o intervalo de variação foi igual a 0,00 a 2,47 mg/L para uma cobertura verde com vegetação do tipo coroa de frade e 0,00 a 1,82 mg/L para uma cobertura verde com vegetação do tipo grama de burro, ambas instaladas em Caruaru-PE.

Nos demais estudos revisados constatou-se também que as coberturas verdes atuam como fonte de ferro. Contudo, os valores relatados são menores do que os observados na presente pesquisa. A justificativa para isto são as diferentes composições de substrato utilizado em cada local, fator este que afeta a maior ou menor liberação de compostos físico-químicos na água.

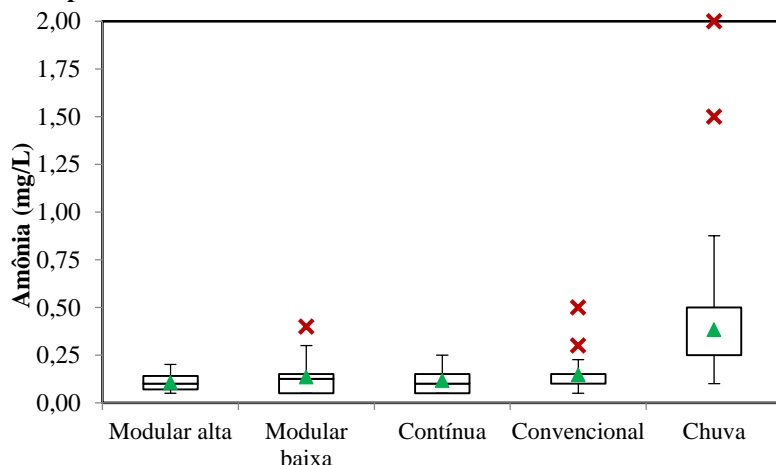
A publicação do CONAMA especifica concentrações limites de ferro, sendo que para águas destinadas aos usos de classe 1 e 2 o limite é igual a 0,03 mg/L e para usos de classe 3 o limite é igual a 5,00 mg/L. Deste modo, verifica-se que a água escoada pelas coberturas verdes modulares e pela cobertura convencional atendeu apenas aos requisitos da classe 3, a qual destina-se para o abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado, para a irrigação de culturas arbóreas, para pesca, para recreação de contato secundário e para a dessedentação de animais.

Apenas a água coletada diretamente da atmosfera apresentou concentrações de ferro dentro do limite aceitável para usos destinados à classe 4 da publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações”, que estipula uma concentração máxima de ferro igual a 0,5 mg/L. Estes usos são referentes ao resfriamento de equipamentos de ar-condicionado.

### 4.3.6 Nitrogênio

Como descrito anteriormente, o nitrogênio pode ser encontrado em diferentes formas, sendo que nesta pesquisa foram determinadas as concentrações de nitrogênio em forma de amônia, nitrito e nitrato. Com relação à amônia, os resultados obtidos durante o período de monitoramento para as coberturas analisadas e para a água da chuva coletada diretamente da atmosfera são apresentados na Figura 26.

**Figura 26 - Valores da concentração de amônia ( $\text{N-NH}_3$ ) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



Observa-se que a passagem da água da chuva pelas coberturas analisadas diminuiu a concentração de amônia. Após a análise estatística, verificou-se que as concentrações obtidas no escoamento de cada cobertura foram significativamente menores do que a concentração da água da chuva coletada diretamente da atmosfera.

De acordo com Alaburda e Nishira (1998), este parâmetro é facilmente absorvido por partículas de solo, fator este que pode explicar suas menores concentrações após a passagem da água pelas coberturas verdes. A água coletada diretamente da atmosfera apresentou valores no intervalo de 0,10 a 2,00 mg/L, com média igual a 0,38 mg/L. As concentrações obtidas nas amostras do escoamento das coberturas verdes

variaram entre 0,05 e 0,40 mg/L, mostrando uma significativa redução deste parâmetro. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Berndtsson *et al.* (2009), cujos valores variaram de 0,75 a 1,70 mg/L para amostras de água de chuva coletadas na Suécia e 0,25 a 2,25 mg/L para amostras de água de chuva coletadas no Japão. No estudo supracitado, a concentração média de amônia foi aproximadamente igual a 0,05mg/L tanto para uma cobertura verde extensiva instalada na Suécia quanto para uma cobertura verde intensiva instalada no Japão. Em Curitiba-PR, Budel (2014) também relatou valores mais elevados de amônia na água coletada diretamente da atmosfera, com concentrações na faixa de 0,15 a 2,25 mg/L. Como no presente trabalho, foram observados alguns picos de concentração em eventos específicos, os quais foram explicados pelo autor devido à possível presença de matéria orgânica transportada por ação do vento.

Comparando-se os resultados das coberturas verdes entre si, percebeu-se que não houve diferença significativa entre os diferentes tipos de sistema analisados, sendo a concentração média de amônia igual a 0,11 mg/L para a cobertura verde modular alta, 0,14 mg/L para a cobertura verde modular baixa e 0,12 mg/L para a cobertura verde contínua. Estes valores são semelhantes aos relatados por Castro (2011), que obteve uma concentração média igual a 0,08 mg/L para uma cobertura verde instalada em um terraço e 0,07 mg/L para uma cobertura verde instalada em um telhado com 15° de inclinação, ambas em Porto Alegre-RS. Destaca-se que se observou um aumento da concentração de amônia em eventos fortes, indicando que em precipitações de maior magnitude o substrato reduz sua capacidade de absorção deste parâmetro. Os maiores valores obtidos foram no evento 35, que apresentou altura pluviométrica igual a 107 mm. As concentrações foram iguais a 0,20 mg/L para a cobertura modular alta, 0,40 mg/L para a modular baixa e 0,25 para a contínua.

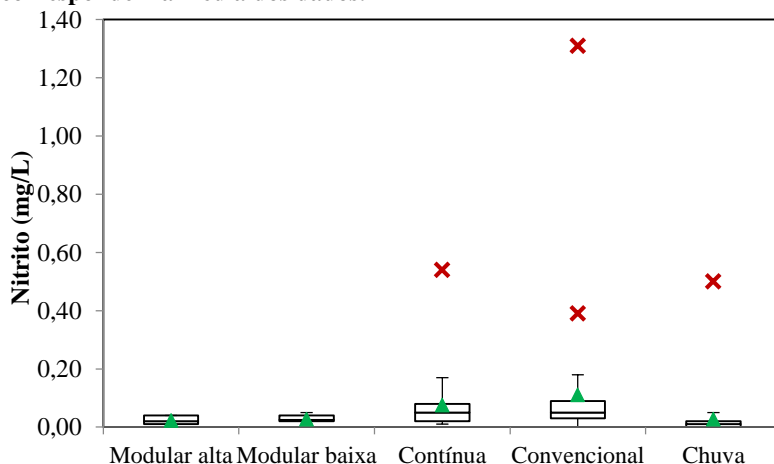
Quanto à cobertura de fibrocimento, observou-se concentrações no intervalo de 0,05 a 0,50 mg/L, com média igual a 0,15 mg/L. Estes valores não diferiram significativamente dos obtidos para as coberturas verdes. Destaca-se que a maior concentração de amônia ocorreu concomitantemente ao pico observado para água da chuva, no evento 12. Infere-se que nesta ocasião possa ter ocorrido depósito de algum material que acarretou um aumento da quantidade deste parâmetro.

Confrontando-se os resultados obtidos com a concentração máxima de amônia recomendada pela EMBRAPA para uso da água na irrigação, verificou-se que a água escoada por todas as coberturas analisadas atendeu ao limite especificado, de 5,00 mg/L. Contudo,

comparando-se com o especificado na publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações” para águas destinadas aos usos da classe 4, a água coletada diretamente da atmosfera apresentou valores superiores ao máximo permitido, igual a 1 mg/L.

O intervalo de valores obtido para a concentração de nitrito da água da chuva coletada diretamente da atmosfera e da água escoada por cada cobertura está ilustrado na Figura 27.

**Figura 27 - Valores da concentração de nitrito ( $\text{N-NO}_2$ ) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



Em geral, verificou-se que os teores de nitrito encontrados na água coletada diretamente da atmosfera e nas coberturas verdes modulares foram baixos e apresentaram pouca variabilidade. Suas concentrações médias foram iguais a 0,02 mg/L para a modular alta, 0,03 mg/L para a modular baixa e 0,03 mg/L para a água da chuva. Contudo, a análise estatística indicou diferença significativa entre o escoamento das coberturas modulares e a água da chuva, mostrando que elas atuaram positivamente na retenção deste parâmetro. Em um dos eventos monitorados, a concentração de nitrito foi acentuada para a água coletada da atmosfera, sendo igual a 0,50 mg/L. Nesta data os valores de amônia também mostraram-se elevados, indicando que provavelmente houve a deposição de algum material que atuou como fonte de nitrogênio.

Semelhante ao reportado no presente trabalho, Budel (2014) e Pessoa (2016) também verificaram valores ínfimos para água da chuva e para as coberturas verdes analisadas por eles.

Diferentemente do observado pelos autores supracitados, a cobertura convencional e a cobertura verde contínua apresentaram concentração de nitrito significativamente maior que a água da chuva e que as coberturas verdes modulares. Os níveis deste parâmetro na cobertura convencional ficaram na faixa de 0,00 a 1,31 mg/L, com média igual a 0,11 mg/L. Na cobertura verde contínua o intervalo de valores foi entre 0,01 e 0,54 mg/L, com média igual a 0,08 mg/L. A máxima concentração observada para ambas as coberturas não acompanhou a tendência dos demais resultados encontrados. Nesta ocasião pode ter ocorrido deposição de excrementos de animais ou de outro parâmetro responsável por ocasionar maior liberação de nitrito na água. Como as coberturas verdes modulares não apresentaram escoamento neste evento, não foi possível verificar a ocorrência de um súbito aumento na concentração de nitrito nestes sistemas.

Comparando-se com a publicação do CONAMA e com a publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações” para águas destinadas aos usos da classe 1, que especificam que a concentração de nitrito deve ser menor que 1mg/L, verifica-se que apenas em um dos eventos monitorados o escoamento da cobertura convencional apresentou concentração fora do limite. As demais coberturas analisadas bem como a água coletada diretamente da atmosfera atenderam a este requisito.

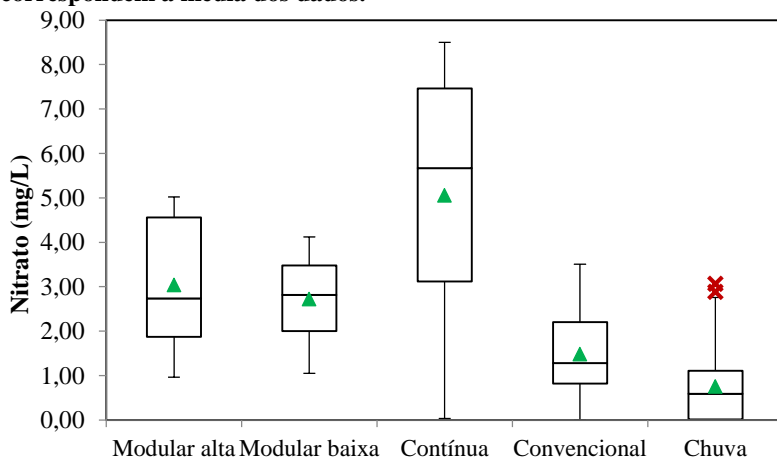
Com relação ao nitrato, constataram-se concentrações mais elevadas deste parâmetro no escoamento de todas as coberturas analisadas e também na água da chuva coletada diretamente da atmosfera. A Figura 28 apresenta os resultados obtidos no período de monitoramento. Os testes foram realizados somente a partir do evento 8, no dia 19 de agosto de 2016, devido aos reagentes necessários para determinação deste parâmetro estarem disponíveis somente nesta data.

A concentração média de nitrato obtida nas amostras da água da chuva coletada diretamente da atmosfera foi igual a 0,75 mg/L, com valores no intervalo de 0,00 a 3,06 mg/L. Resultados semelhantes foram reportados por Pessoa (2016), que encontrou níveis de nitrato na água da chuva em Santa Maria-RS entre 0,32 e 2,22 mg/L, com média igual a 0,93 mg/L.

Observou-se que todas as coberturas verdes atuaram como fonte expressiva de nitrato, visto que suas concentrações foram significativamente maiores que as obtidas na água coletada da atmosfera. Os níveis de nitrato nas amostras coletadas na cobertura verde modular

alta ficaram compreendidos entre 0,96 e 5,02 mg/L, com concentração média igual a 3,04 mg/L. Na cobertura verde modular baixa estes valores oscilaram entre 1,05 e 4,12 mg/L, com média igual a 2,72 mg/L. Por sua vez, a cobertura verde contínua mostrou maior variabilidade, com média igual a 5,06 mg/L e valor mínimo e máximo iguais a 0,03 e 8,50 mg/L, respectivamente. Comparando as coberturas verdes entre si, verificou-se que apenas a modular baixa e a contínua apresentaram diferenças significativas. Destaca-se que mesmo apresentando teores mais elevados em alguns eventos, não se pode afirmar que a cobertura verde contínua teve desempenho significativamente inferior ao da modular alta.

**Figura 28 - Valores da concentração de nitrato ( $\text{N-NO}_3$ ) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



Em consonância com o presente trabalho, algumas das pesquisas revisadas na literatura também constataram que as coberturas verdes atuaram como fonte de nitrato na água escoada (TEEMUSK; MANDER, 2007; VIJAYARAGHAVAN; JOSHI; BALASUBRAMANIAN, 2012; CASTRO, 2011; FARIAS, 2012; BUDEL, 2014). Contudo os níveis encontrados em cada estudo são expressivamente distintos quando comparados entre si. Por exemplo, Farias (2012) relatou concentrações de até 112,5 mg/L para uma cobertura verde em Curuaru-PE. Em contraste, os valores obtidos por Teemusk e Mander (2007) ficaram entre 0,44 e

0,75 mg/L, muito inferiores ao anteriormente citado. Semelhante ao encontrado para as coberturas verdes neste trabalho, Moran *et al.* (2005) encontrou níveis de nitrato na ordem de 0,80 a 6,90 mg/L nas águas escoadas por coberturas verdes instaladas na Carolina do Norte.

Diante do exposto acima, constatou-se que as características de cada cobertura verde (tipo e espessura do substrato, idade da cobertura, inclinação, tipo de manutenção, entre outros) têm grande influência na liberação deste nutriente na água. Neste sentido, Teemusk e Mander (2007) afirmam que as concentrações de nitrogênio em suas distintas formas tende a diminuir à medida que as coberturas verdes atingem a estabilidade. Este comportamento decrescente foi observado nas coberturas analisadas até o evento do dia 25 de outubro, onde as concentrações de nitrato apresentaram novamente valores mais elevados. Este aumento foi relacionado com a manutenção das coberturas verdes que foi realizada alguns dias anteriores a este evento. Durante o monitoramento houve a disseminação de algumas espécies vegetais invasoras nas coberturas verdes, e tendo em vista que este procedimento é esperado em uma situação real, no dia 21 de outubro foi realizada a retirada destas plantas daninhas. Este processo pode ter ocasionado alguma movimentação do substrato, e, com isto, uma maior liberação de componentes químicos na água. Contudo, infere-se que é necessário um maior tempo de monitoramento a fim de obter maiores conclusões acerca deste fato. Após o evento supracitado, a concentração de nitrato na água escoada pelas coberturas verdes modulares voltou a diminuir. Na cobertura verde contínua este comportamento não foi observado, sendo que a partir do mês de dezembro obtiveram-se concentrações elevadas de nitrato no escoamento. Isto pode estar associado à condição seca que a vegetação desta cobertura apresentou neste período.

Quanto à cobertura convencional, a concentração de nitrato apresentou valores entre 0,00 e 3,51 mg/L, com média igual a 1,48 mg/L. Estes resultados são superiores aos obtidos para água da chuva coletada diretamente da atmosfera. Contudo, comparativamente às coberturas verdes, constatou-se que os níveis foram significativamente menores nesta cobertura, mostrando que o substrato agiu como fonte deste nutriente.

Segundo a publicação da EMBRAPA, concentrações de nitrato de até 10mg/L são aceitáveis para utilização da água para irrigação. Este limite também é imposto na publicação do CONAMA, para águas destinadas aos usos da classe 1, 2 e 3, e na publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações”, para águas destinadas aos usos da

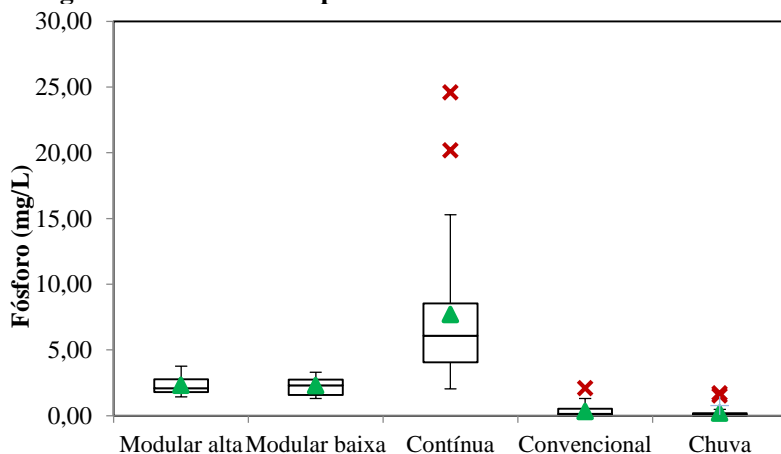
classe 1. Deste modo, constata-se que a água escoada por todos os sistemas analisados atendeu ao preconizado nestas situações.

Em geral, considerando-se a análise global das distintas formas de nitrogênio avaliadas neste estudo, infere-se que os menores valores de amônia encontrados nas coberturas analisadas indicam que possa estar ocorrendo o fenômeno de nitrificação, ou seja, a amônia é transformada em nitrito, e em seguida, a nitrato. Neste mesmo sentido, de acordo com Garcez (2004), o nitrito é uma forma instável de nitrogênio, podendo ser facilmente oxidada a nitrato. Isso pode explicar as maiores concentrações deste parâmetro em todos os eventos monitorados.

#### 4.3.7 Fósforo

Na Figura 29 é apresentado os resultados referentes à concentração de fósforo total de cada cobertura analisada e da água da chuva coletada diretamente da atmosfera.

**Figura 29 - Valores da concentração de fósforo (P) encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



Após análise estatística verificou-se que as amostras de água da chuva coletada diretamente da atmosfera e as amostras do escoamento da cobertura convencional não apresentaram diferenças significativas



quando comparadas entre si. Em geral seus valores foram baixos e com pouca variabilidade, sendo que em muitos eventos a concentração de fósforo foi nula. O resultado médio obtido para a água da chuva foi igual a 0,21 mg/L e para a cobertura de fibrocimento foi igual a 0,32 mg/L. Os máximos níveis de fósforo observados para ambos ocorreu no evento 2, no dia 22 de junho, sendo igual a 2,09 mg/L e 1,70 mg/L para cobertura convencional e para água da chuva, respectivamente. É possível que nesta ocasião tenha ocorrido depósito de algum material que propiciou o aumento da concentração deste parâmetro nas amostras coletadas.

Com relação às coberturas verdes, observou-se que elas atuaram como fonte de fósforo, visto que houve um substancial incremento deste parâmetro nas amostras do escoamento destes sistemas, principalmente na cobertura verde contínua, a qual apresentou concentração no intervalo de 2,03 a 24,60 mg/L e média igual 7,71 mg/L. Estes valores são significativamente maiores que os obtidos nas coberturas modulares, as quais apresentaram concentração média igual a 2,31 mg/L para a modular alta e 2,29 mg/L para a modular baixa. Esta diferença de resultados pode ser justificada pela pequena quantidade de substrato utilizada nas modulares, sendo sua espessura equivalente a 1 centímetro, fator que provocou menor liberação deste parâmetro na água escoada.

Bliss *et al.* (2009) reportou valores semelhantes aos encontrados para as coberturas verdes modulares. O autor encontrou níveis de fósforo entre 2,00 e 3,00 mg/L para uma cobertura verde instalada na Pensilvânia. No estudo de Teixeira (2013), o qual analisou diferentes configurações de coberturas verdes, verificou-se que todos os sistemas analisados atuaram como fonte de fósforo. Entre os resultados obtidos pela autora, observaram-se concentrações similares aos encontrados na presente pesquisa, tanto para as coberturas verdes modulares quanto para cobertura verde contínua. Outros estudos revisados também constataram que as coberturas verdes atuam como fonte deste nutriente no escoamento pluvial, principalmente devido à utilização de fertilizantes ou à composição do substrato, que geralmente contém altos teores de matéria orgânica (HATHAWAY; HUNT; JENNINGS, 2008; HARPER *et al.*, 2013).

Entre tipos de cobertura analisadas, verificou-se que as coberturas verdes apresentaram teores de fósforo significativamente maiores que os da cobertura convencional. Este mesmo comportamento foi constatado em outros estudos (HATHAWAY *et al.*, 2008; BLISS *et al.*, 2009; CASTRO, 2011; TEIXEIRA 2013). Em dissonância com estes resultados, tanto Teemusk e Mander (2007) quanto Gregoire e Clausen (2011) observaram que as concentrações de fósforo na cobertura

convencional foram mais elevadas que as das coberturas verdes. Os autores justificaram isso devido ao acúmulo de poeira ou outros contaminantes na superfície destes sistemas e também a escolha do substrato das coberturas verdes, que proporcionou menor liberação deste parâmetro no escoamento. Ambos apresentaram pouca quantidade de matéria orgânica em sua composição.

Além da composição do substrato utilizado, a dinâmica do fósforo nas coberturas verdes mostra ser dependente da idade do sistema. Nas pesquisas de Teixeira (2013) e Budel (2016) foi observado que as concentrações deste parâmetro tendem a diminuir com o passar do tempo, sugerindo que com a estabilização do substrato e da vegetação, a cobertura verde diminui a liberação deste composto na água. Outro fator que provoca esta diminuição é a menor influência dos fertilizantes, quando ocorre a utilização dos mesmos. No presente estudo, observou-se que as concentrações de fósforo diminuíram constantemente com o decorrer do monitoramento em todas as coberturas verdes, até o evento 19, onde se registrou um aumento nos níveis de fósforo em todas elas. Isto foi concomitante com o aumento das concentrações de nitrato. Como mencionado anteriormente, poucos dias antes deste evento houve retirada de algumas ervas daninhas que surgiram nas coberturas verdes. Isto pode ter ocasionado uma leve movimentação no substrato, e, com isso, uma maior liberação de nutrientes na água escoada. Destaca-se que a diminuição da concentração de fósforo foi mais proeminente na cobertura verde contínua. As duas primeiras amostras deste sistema apresentaram níveis maiores que 20 mg/L. Estes valores decaíram para metade na terceira e quarta coleta e a partir quinta os teores ficaram na ordem de 2,03 a 8,54 mg/L. Isto demonstra que coberturas verdes jovens tendem a liberar maior quantidade de poluentes na água do que coberturas maduras.

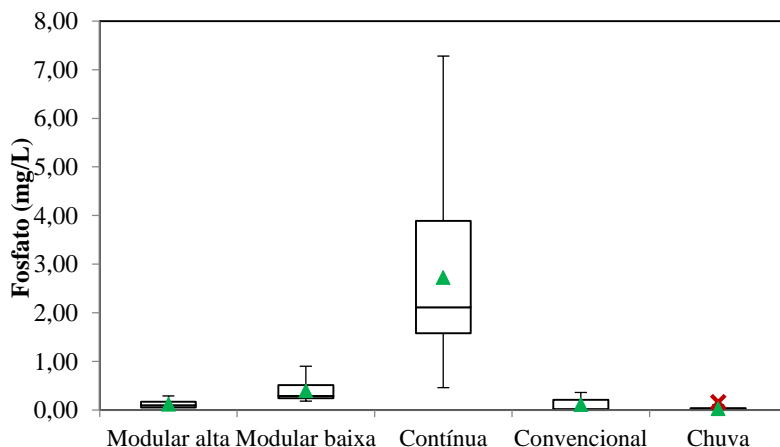
Além disto, verificou-se que as concentrações de fósforo na cobertura contínua foram influenciadas pela sazonalidade. No mês de janeiro observou-se um aumento dos níveis deste parâmetro na água escoada, indicando que as maiores temperaturas e/ou a condição seca que a vegetação apresentou neste período contribuiu para maior liberação de fósforo no escoamento.

A publicação do CONAMA especifica o limite de fósforo igual a 0,03 mg/L para águas destinadas aos usos da classe 1 e 2 e igual a 0,05 mg/L para águas destinadas aos usos da classe 3. Por outro lado, na publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações”, o limite de fósforo permitido é igual a 0,1 mg/L para águas destinadas aos usos da classe 1 e igual a 1mg/L para águas destinadas aos usos da classe 4. Comparando-se com os resultados, verifica-se que tanto a água coletada

diretamente da atmosfera quanto a água escoada pelas coberturas não atenderam ao preconizado em nenhuma das situações.

A presença de fósforo também foi avaliada quando o mesmo se encontra na forma de fosfato, contudo, as análises iniciaram somente a partir do dia 19 de agosto, data em que os reagentes necessários para execução deste teste ficaram disponíveis. A Figura 30 apresenta a variação das concentrações obtidas para os sistemas de cobertura analisados e para água da chuva coletada diretamente da atmosfera durante o período de monitoramento

**Figura 30 - Valores da concentração de fosfato encontrados para as quatro coberturas analisadas e para água da chuva no período de monitoramento. Os pontos em vermelho correspondem aos valores fora do intervalo máximo superior ou inferior e os triângulos em verde correspondem à média dos dados.**



A água da chuva coletada diretamente da atmosfera apresentou valores iguais ou próximos a zero durante todo o período de monitoramento, com valores no intervalo de 0,00 a 0,16 mg/L e média igual a 0,02 mg/L. Após análise estatística verificou-se que apenas a cobertura convencional não comportou-se como fonte significativa de fosfato, apresentando valores semelhantes ao observado para água da chuva. Os teores obtidos nesta cobertura ficaram na faixa de 0,00 a 0,36 mg/L, com média igual a 0,11 mg/L. No estudo de Pessoa (2016) o autor também verificou baixos níveis de fosfato na água escoada por uma cobertura convencional.

Em contraste com a cobertura convencional, todas as coberturas verdes agiram como fonte significativa de fosfato na água da chuva, principalmente a contínua. As concentrações observadas nas amostras do escoamento desta cobertura apresentaram grande variabilidade e foram significativamente maiores que as concentrações obtidas nas outras coberturas analisadas. Os níveis de fosfato oscilaram entre 0,46 e 7,28 mg/L, com média igual a 2,73 mg/L. No estudo de Pessoa (2016), o autor reportou concentrações nesta mesma ordem de valores, sendo a concentração média obtida para dois tipos de coberturas verdes iguais a 5,85 mg/L e 1,15 mg/L. Destaca-se que semelhante ao que foi observado para os parâmetros referentes ao nitrito e ao fósforo, houve um aumento na concentração de fosfato após a manutenção realizada para retirada das ervas daninhas. Além disto, os maiores teores deste parâmetro foram obtidos no mês de janeiro, indicando que a sazonalidade foi um fator influente na qualidade da água escoada pela cobertura verde contínua.

Quanto às coberturas verdes modulares, os valores obtidos foram significativamente superiores ao observado na água da chuva, contudo, foram menos proeminentes do que as concentrações encontradas para cobertura verde contínua. As médias obtidas foram iguais a 0,12 mg/L para a cobertura modular alta e 0,39 mg/L para a cobertura modular baixa, apresentando diferença significativa quando comparadas entre si. Berndtsson (2008) relatou valores semelhantes para uma cobertura verde instalada na Suécia, sendo os que os níveis reportados ficaram no intervalo de 0,25 a 0,30 mg/L. Destaca-se que entre as coberturas verdes, a que obteve melhor desempenho no controle do fosfato foi a modular alta. O escoamento desta cobertura apresentou concentrações significativamente semelhantes ao escoamento da cobertura convencional.

Com estes resultados constatou-se que as coberturas verdes atuaram como fonte de fósforo e seus componentes, principalmente a cobertura verde contínua, que apresentou os maiores resultados. Ressalta-se que a maior quantidade de substrato utilizada nesta cobertura pode ter contribuído para maior lixiviação de nutrientes na água escoada.

#### **4.3.8. Coliformes totais e termotolerantes**

Como mencionado no capítulo 3, a presença de coliformes totais e termotolerantes foi determinada em apenas um evento monitorado, visto que o padrão de qualidade da água para usos não potáveis, preconizado pela NBR 15.527, exige apenas análise semestral destes parâmetros. Deste modo, os resultados obtidos no escoamento de cada cobertura verde

e da água da chuva coletada diretamente da atmosfera estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Resultados da análise de coliformes totais e termotolerantes.**

<b>Amostra</b>	<b>Coliformes totais (NMP/100mL)</b>	<b>Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)</b>
Cobertura verde modular alta	> 2419,8	1,0
Cobertura verde modular baixa	> 2419,8	0,0
Cobertura verde contínua	> 2419,8	579,4
Cobertura convencional	517,2	13,2
Água da chuva	0,0	0,0

Verifica-se que tanto as coberturas verdes quanto a convencional atuaram como fonte de coliformes totais, visto que a concentração deste parâmetro para a água da chuva coletada diretamente da atmosfera foi nula. Os maiores valores foram observados no escoamento das coberturas verdes, sendo que todas elas apresentaram contagem maior que 2419,8 NMP/100 ml. Na cobertura convencional este valor foi igual a 517,2 NMP/100 ml. As concentrações mais elevadas nas coberturas verdes decorrem da presença de matéria orgânica, que, segundo a CETESB (2009), contribui para o aumento da presença de coliformes totais.

Quanto à presença de coliformes termotolerantes, verificou-se que a concentração foi nula na água da chuva coletada diretamente da atmosfera e no escoamento da cobertura verde modular baixa. Mesmo em quantidades menores que o observado para os coliformes totais, as demais coberturas mostraram-se como fonte deste parâmetro, principalmente a cobertura verde contínua, que apresentou contagem igual a 579,4 NMP/100 mL. O comportamento das coberturas modulares foi semelhante visto que a concentração obtida na modular alta foi muito pequena, igual a 1,0 NMP/100 mL. Os coliformes termotolerantes estão associados exclusivamente à contaminação fecal. Deste modo, infere-se que houve deposição de excrementos de animais nas superfícies que indicaram presença deste parâmetro no escoamento. Além disso, o substrato utilizado pode ter compostos de origem fecal em sua composição, explicando a maior quantidade de coliformes

termotolerantes na cobertura verde contínua, que possui camada de substrato mais espessa.

Comportamento semelhante a este foi reportado por Pessoa (2016), que analisou dois tipos de coberturas verdes e uma cobertura convencional em Santa Maria-RS. Nesse estudo observaram-se concentrações de coliformes totais acima de 2420 NMP/ 100 mL para todas as coberturas. Quanto à presença de coliformes termotolerantes, o autor reportou valores entre 0,0 e 790,0 NMP/100 ml para as coberturas verdes e 0,0 e 55,0 NMP/100 ml para cobertura convencional. Do mesmo modo, na cidade de Campinas-SP, Teixeira (2013) encontrou quantidades nesta mesma ordem de grandeza na água escoada por diferentes tipos de coberturas verdes e por uma cobertura convencional. Contudo, em dissonância com o presente estudo, a água da chuva coletada diretamente da atmosfera nos supracitados estudos indicou presença de coliformes totais e termotolerantes. Os autores associaram isto à presença de contaminantes ou de excremento de animais no recipiente de coleta da água da chuva. Uma maior representatividade de dados neste estudo poderia conduzir a resultados semelhantes aos da literatura.

Comparando-se com a NBR 15.527, que exige ausência de coliformes totais e termotolerantes, verifica-se que nenhuma das coberturas analisadas atendeu ao preconizado pela norma.

A NBR 13.969, que especifica padrões de qualidade para uso de efluentes domésticos em usos não potáveis, limita a contagem de coliformes em 500 NMP/100ml para águas destinadas aos usos das classes 1, 2 e 3. Apenas a classe 4, que é destinada a irrigação de pomares, cereais, forragens e pastagens para gado permite contagem de coliformes até 5000 NMP/100ml. Ou seja, o escoamento das coberturas analisadas atendeu somente a este requisito, sendo necessário tratamento prévio da água escoada quando destinada a outros usos.

Por fim, a publicação “Conservação e Reuso de Águas em Edificações” especifica ausência de coliformes totais e termotolerantes para águas destinadas aos usos da classe 1. Para águas destinadas aos usos da classe 3, o limite de contagem destes microorganismos é 200 NMP/100ml, e, para águas destinadas aos usos da classe 2, o limite é 1000 NMP/100ml. Deste modo, verifica-se que apenas o escoamento da cobertura convencional atendeu aos requisitos da classe 2, podendo ser utilizada nas fases de construção da edificação, como por exemplo, preparação de concreto.

### 4.3.9 Comparativo com a NBR 15.527

A NBR 15.527 dispõe sobre os requisitos para aproveitamento da água da chuva em áreas urbanas para fins não potáveis. Para isso, determina o intervalo máximo de alguns parâmetros de qualidade da água a serem seguidos para usos mais restritivos. Deste modo, compararam-se os resultados obtidos nas amostras do escoamento de cada cobertura com os valores preconizados na norma. O comparativo realizado está apresentado na Tabela 17.

**Tabela 17 - Comparativo realizado entre os resultados obtidos nas coberturas analisadas e os valores recomendados pela NBR 15.527.**

Parâmetro	Limite da norma	Intervalo obtido nas coberturas (mínimo e máximo)			
		Modular alta	Modular baixa	Contínua	Convencional
pH	6,00 8,00	6,55 7,90	5,15 6,91	5,55 7,58	7,44 9,14
Turbidez (NTU)	2,00	1,08 5,00	0,87 6,20	1,34 21,37	0,27 8,27
Cor Aparente (uC)	15	204 285	188 332	223 841	1 29
Coliformes totais (NMP/100ml)	Ausência	>2419,8	>2419,8	>2419,8	517,2
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	Ausência	1,0	0,0	579,4	13,2

Verifica-se que nenhuma das coberturas atendeu aos requisitos de qualidade para usos não potáveis. Apenas a cobertura verde modular alta apresentou limites aceitáveis para o valor de pH. Quanto à turbidez, todas as coberturas obtiveram níveis maiores que 2,00 NTU. Contudo, a norma prevê que para usos menos restritivos o limite de turbidez pode ser considerado igual a 5,00 NTU. Nesse caso, a cobertura verde modular alta atende a condição imposta para este parâmetro.

Em relação à cor aparente, nenhuma das coberturas atendeu ao limite imposto pela norma, sendo que, para as coberturas verdes os valores obtidos foram muito elevados. De fato, todas as amostras coletadas nestas coberturas apresentaram cor amarelada. Destaca-se que um dos fatores que mais causa rejeição ao usuário corresponde à cor da água. Sendo assim, é importante realizar o tratamento prévio da água a fim de remover sua cor antes da mesma seguir para o sistema de abastecimento.

A análise dos parâmetros microbiológicos indicou que o escoamento de todas as coberturas apresentou contaminação por material fecal e/ou matéria orgânica. A contagem de coliformes totais foi elevada para todas as coberturas, principalmente para as verdes. Quanto aos coliformes termotolerantes, mesmo apresentando concentração menor em todas as amostras, não atendeu aos requisitos da norma, que exige ausência deste parâmetro na água.

Com isso, infere-se que tanto a água escoada pelas coberturas verdes quanto a água escoada pela cobertura convencional necessitam de tratamento prévio para serem destinadas a fins não potáveis. Uma sugestão para o tratamento da água seria realizar as etapas de filtração, para diminuir a turbidez e a cor aparente da água escoada, e de cloração, para remoção dos microorganismos presentes no escoamento. Além disso, recomenda-se a instalação de um dispositivo que realize o descarte da água do escoamento inicial. Os primeiros milímetros de chuva são responsáveis pelo carreamento das substâncias depositadas na superfície da cobertura. Deste modo, o uso deste tipo de dispositivo pode contribuir para melhorar a qualidade da água coletada.

#### 4.4 POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL DE CADA SISTEMA

Após a obtenção dos valores de coeficiente de escoamento superficial médio de cada cobertura, foram realizadas as simulações computacionais no programa Netuno, o qual relacionou o potencial de economia de água potável com o volume do reservatório inferior. Deste modo foi possível analisar a eficiência de um sistema de aproveitamento de água considerando-se edificações que possuam coberturas verdes. Todas as variáveis de entrada foram descritas no capítulo 3. Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Na Figura 31 é possível verificar os potenciais de economia que podem ser obtidos para cada tipo de cobertura em função do volume do reservatório, considerando-se as diferentes áreas de captação que foram



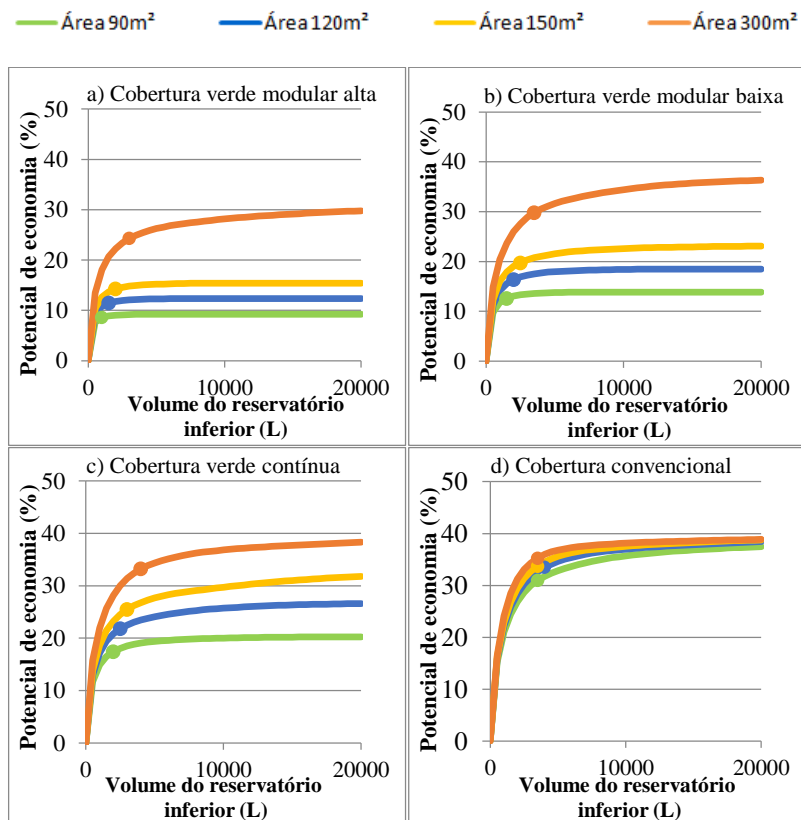
simuladas, o número de moradores igual a 4, o consumo diário por habitante igual a 175 litros e o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40%. Os pontos em destaque correspondem ao volume de reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável obtido. Resultados semelhantes a estes foram obtidos nas simulações que consideraram número de moradores iguais a 3 ou 4 e percentuais de substituição iguais a 30, 40 ou 50%. No Apêndice B estão apresentados os gráficos obtidos nessas simulações.

Percebe-se que as curvas do gráfico tendem a linearidade quando o potencial de economia de água potável não aumenta com o incremento do volume do reservatório inferior. Para as coberturas verdes modulares, a curva tende a linearidade rapidamente, principalmente para as áreas de captação de até 150m<sup>2</sup>, onde a disponibilidade de água da chuva é baixa. Ou seja, nestes tipos de cobertura a utilização de reservatórios com volumes maiores que 2.000 litros não proporcionam aumentos significativos de economia de água potável. Por exemplo, para uma área de captação de 90m<sup>2</sup> utilizando a cobertura verde modular alta, um reservatório de 1.000 litros é suficiente para captar a água da chuva escoada, sendo o correspondente potencial de economia igual a 8,61%. Além disso, observa-se que a máxima economia oferecida por esta cobertura nestas condições é igual a 9,25%. Por outro lado, para cobertura convencional, quanto maior a área de captação, mais rapidamente a curva tende a linearidade. Isto ocorre devido ao fato que grandes áreas de captação são capazes de encher o reservatório rapidamente devido à elevada disponibilidade de água. Caso a demanda de água da chuva seja baixa, grandes volumes de reservatório irão acumular água desnecessária.

Também se pode verificar que quanto menor a área de captação, maior a diferença entre os potenciais de economia de água potável que cada cobertura analisada pode alcançar. Isso ocorre devido ao baixo valor de coeficiente de escoamento superficial das coberturas verdes. Este fator combinado com menores áreas de captação faz com que a economia de água potável seja pequena nestes casos. Para a área de captação de 300m<sup>2</sup> percebe-se que os potenciais alcançados são consideráveis até mesmo para as coberturas verdes modulares, as quais apresentaram os menores valores de coeficientes de escoamento. Além disso, a economia que a cobertura verde contínua pode oferecer é muito similar à da cobertura convencional. De fato, constata-se que nesta situação as curvas destas coberturas apresentam comportamento semelhante, sendo que a diferença entre o potencial de economia alcançado pelas duas foi de aproximadamente 15% para área de captação de 90m<sup>2</sup>, 12% para área de

captação de 120m<sup>2</sup>, 8% para área de captação de 150m<sup>2</sup> e 2% para área de 300m<sup>2</sup>.

**Figura 31 – Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40% e número de moradores igual a 4.**



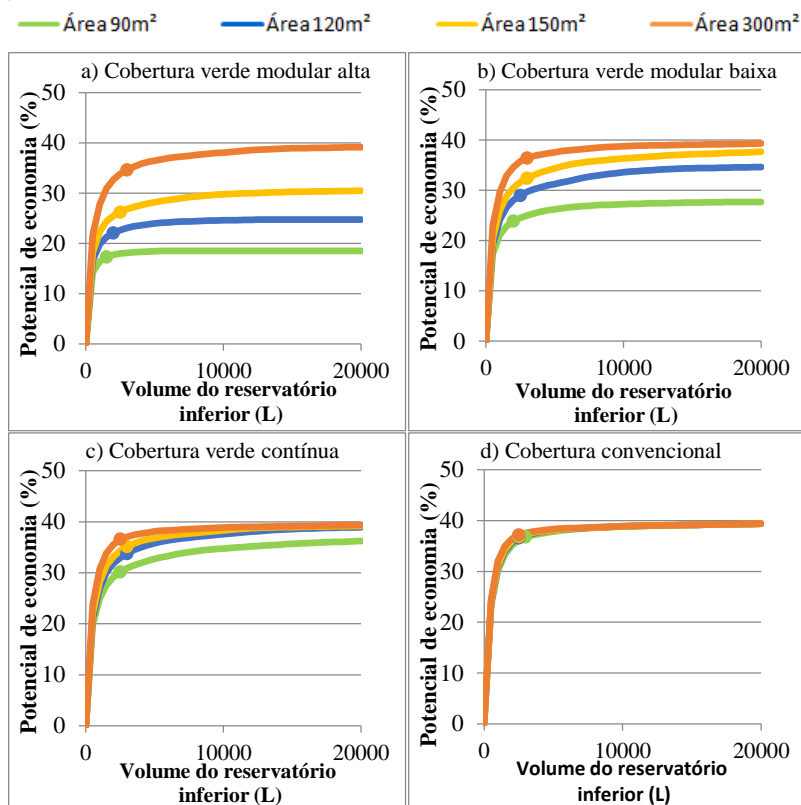
Destaca-se que para as coberturas verdes, quando o número de moradores da residência diminui, a influência da variação da área de cobertura é menos perceptível. A Figura 32 mostra o potencial de economia de água potável obtido considerando-se um percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40%, número de moradores igual a 2 e consumo por habitante igual a 175 l/hab./dia. As outras simulações que utilizaram número de moradores igual a 2

apresentaram comportamento semelhante a este e os resultados encontram-se no Apêndice B.

Percebe-se que neste cenário o potencial de economia de água potável que pode ser alcançado por um sistema de aproveitamento de água da chuva que possua cobertura verde é mais satisfatório. Isto ocorre devido à menor demanda de água da residência, que faz com que mesmo as coberturas verdes, que possuem baixo potencial de coleta de água da chuva, ofereçam um sistema de aproveitamento mais viável. Com exceção da situação que considera área de captação igual a 90m<sup>2</sup>, a cobertura verde contínua apresentou comportamento muito semelhante à cobertura convencional, sendo a diferença entre os potenciais de economia alcançados menor que 3%. Até mesmo a cobertura verde modular alta, que possui o menor coeficiente de escoamento superficial, mostrou potencial de economia de 17,27% para área de captação igual a 90m<sup>2</sup> e de 34,61% para área de captação igual 300m<sup>2</sup>. Este comportamento é mais evidente quando se considera o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 30%. De fato, neste caso a demanda por água da chuva é ainda menor, o que faz com que um sistema de aproveitamento de água da chuva em uma residência com cobertura verde não apresente diferenças expressivas quando comparado com um sistema em uma residência com cobertura convencional.

O volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cada tipo de cobertura nos diferentes cenários considerados encontram-se no Apêndice C. Os resultados mostram que a cobertura verde modular alta pode alcançar um potencial de economia de até 40,04% utilizando um reservatório de 3000 litros. Isto é obtido em uma residência unifamiliar com 2 moradores, percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 50% e área de captação igual a 300m<sup>2</sup>. Por outro lado, em uma residência com 4 moradores, percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40% e área de captação igual a 90m<sup>2</sup>, o potencial de economia obtido é apenas 8,62%, utilizando-se o volume do reservatório ideal, igual a 1000 litros. A diferença de potenciais obtidos nestes dois cenários evidencia a influência da área de captação e do número de moradores quando a edificação apresenta este tipo de cobertura. Comportamento semelhante foi observado para cobertura verde modular baixa. O menor e o maior potencial de economia alcançado foram, respectivamente, iguais a 12,62% com reservatório ideal de 1500 litros e 43,34% com reservatório ideal de 3000 litros. Isto foi obtido nos mesmos cenários observados para cobertura modular alta.

**Figura 32 – Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40% e número de moradores igual a 2.**



Para cobertura verde contínua, os potenciais de economia de água potável que podem ser alcançados são mais satisfatórios. O pior caso foi observado para uma residência unifamiliar com 4 moradores, percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 30% e área de captação igual a 90m<sup>2</sup>. Neste cenário, o potencial de economia de água potável obtido foi igual a 17,14%, utilizando o volume de reservatório ideal igual a 2500 litros. Para as simulações que utilizaram área de captação igual a 300m<sup>2</sup> os potenciais de economia de água potável foram elevados, entre 26,53 e 44,99%. Os volumes dos reservatórios ideais variaram entre 2000 e 4000 litros. Para esta situação, os resultados foram semelhantes aos obtidos para cobertura convencional, que apresentou potenciais de economia de água potável entre 27,16 e 46,21% e mesmo

intervalo para os volumes de reservatório. A diferença entre os potenciais de economia de água potável da cobertura verde contínua e da cobertura convencional decresceu com o aumento da área de captação, diminuição do número de moradores e diminuição do percentual de substituição de água potável por água da chuva. De fato, a maior diferença foi igual a 17,68% considerando-se uma residência com 4 moradores, percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 50% e área de captação igual a 90m<sup>2</sup>. Em contraste, para uma residência com 2 moradores, percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 30% e área de captação igual a 300m<sup>2</sup> a diferença observada foi muito pequena, igual a 0,38%.

Destaca-se que o programa considera o descarte do escoamento inicial igual a 2mm em todas os eventos de precipitação simulados. Contudo, quando as chuvas ocorrem em dias consecutivos, não haveria necessidade deste descarte após o primeiro evento, pois a superfície das coberturas estará sem acúmulo de poeira e outros detritos. Caso se considerasse que nestas ocasiões não ocorresse o descarte dos primeiros milímetros de chuva, o potencial de economia de água potável alcançado seria maior.

Deste modo, infere-se que o potencial de economia de água potável que pode ser obtido com um sistema de aproveitamento de água da chuva está sujeito a muitos fatores. A demanda de água, que é dependente do número de moradores, do consumo de água por habitante e do percentual de substituição de água potável por água da chuva, e a disponibilidade de água, que está relacionada às características pluviométricas da região, à área de captação e ao coeficiente de escoamento superficial. No caso da cobertura verde modular alta e da cobertura verde modular baixa, que apresentaram coeficientes de escoamento igual a 0,16 e 0,24, respectivamente, o potencial de economia de água potável alcançado é menor, sendo mais significativo para grandes áreas de captação e/ou para residências com menor número de moradores. Para estes tipos de cobertura deve-se analisar a situação de demanda e disponibilidade, pois a combinação de pequenas áreas de captação com elevadas demandas pode acarretar em um sistema inviável. Por outro lado, a cobertura verde contínua, mesmo apresentando um coeficiente de escoamento superficial baixo, igual a 0,35, pode ser capaz de proporcionar uma economia de água potável considerável, sendo que dependendo do cenário, os valores obtidos foram similares aos da cobertura convencional.

Outra análise realizada corresponde ao percentual de dias em que a demanda de água da chuva foi atendida completamente, parcialmente

ou não foi atendida. A Tabela 18 apresenta os valores mínimos e máximos obtidos para os diferentes tipos de cobertura avaliados.

**Tabela 18 - Percentuais de dias em que a demanda é atendida completamente, parcialmente ou não atendida.**

Tipo de cobertura	Demanda atendida completamente (%)		Demanda atendida parcialmente (%)		Demanda não é atendida (%)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Modular alta	7,6	90,7	0,8	25,7	8,5	66,7
Modular baixa	15,9	92,8	0,4	22,3	6,8	61,8
Contínua	26,9	92,4	0,5	18,6	7,2	54,6
Convencional	68,2	93,5	0,3	5,8	6,2	26,1

Como esperado, quando se utiliza cobertura verde, há situações em que na maior parte dos dias o sistema de aproveitamento não é capaz de atender a demanda de água da chuva da residência. Os valores mínimos observados correspondem a situações em residências com área de captação igual 90m<sup>2</sup>, 4 moradores e percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 50%. Ou seja, como a demanda de água da chuva é muito elevada e sua disponibilidade baixa, o sistema não consegue suprir a quantidade de água necessária para os usos não potáveis. O melhor cenário observado corresponde às situações em que a área de captação da residência é igual a 300m<sup>2</sup>, o número de moradores igual a 2 e o percentual de substituição de água potável por pluvial igual a 30%.

Por outro lado, para residências com cobertura convencional, até mesmo nas situações onde a área de captação é pequena e a demanda elevada, o sistema consegue oferecer a quantidade de água da chuva necessária aos usos não potáveis na maior parte dos dias do ano. No pior cenário, 68,2% dos dias do ano são completamente atendidos. Quando a demanda de água da chuva não é atendida, a água potável distribuída pela concessionária é utilizada, diminuindo o potencial de economia alcançado pelo sistema. Em períodos que o índice pluviométrico é baixo, o sistema de aproveitamento geralmente não consegue atender a demanda de água da chuva, principalmente quando se utiliza cobertura verde, devido seu

elevado potencial de retenção do escoamento. De fato, na maioria dos casos verificou-se que o percentual de dias em que o sistema de aproveitamento atende completamente a demanda é muito menor para residências que utilizam cobertura verde, até mesmo para a contínua, que em alguns cenários atingiu potencial de economia semelhante ao obtido em residências com cobertura convencional.





## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas após a realização desta pesquisa. Além disso, também são descritas suas limitações e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Este estudo teve por objetivo principal analisar o comportamento no controle quantitativo e qualitativo do escoamento pluvial de diferentes tipos de cobertura verde e de uma cobertura convencional na cidade de Florianópolis-SC. Complementarmente, avaliou-se o potencial de economia de água potável que estas coberturas podem alcançar caso seja empregado um sistema de aproveitamento de água da chuva.

Foram construídos quatro protótipos, os quais simularam três tipos de cobertura verde e uma cobertura convencional com telhas de fibrocimento. As coberturas verdes analisadas corresponderam a um sistema contínuo e dois sistemas modulares (modular alto e modular baixo), ambos fornecidos pela empresa Ecotelhado. Estes protótipos foram monitorados por oito meses, sendo que após cada evento de precipitação foi realizada a análise quantitativa e qualitativa do escoamento gerado por cada cobertura. Para verificar se os diferentes tipos de cobertura atuaram como fonte de poluentes, a qualidade da água da chuva coletada diretamente da atmosfera também foi determinada.

### 5.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise do controle quantitativo do escoamento pluvial gerado por cada cobertura foi realizada por meio da determinação de parâmetros hidrológicos, como o coeficiente de escoamento superficial e a capacidade de retenção por unidade de área.

A partir do monitoramento de 35 eventos de chuva ocorridos entre os meses de junho de 2016 a janeiro de 2017, verificou-se de modo geral que as coberturas verdes apresentaram elevada capacidade de retenção do escoamento pluvial. Os coeficientes de escoamento superficial médio destas coberturas foram iguais a 0,16 para a modular alta, 0,24 para a modular baixa e 0,35 para a contínua. Em contrapartida, para a cobertura convencional foi igual a 0,92. Ou seja, enquanto esta cobertura retém em média apenas 8% da precipitação incidida em sua área de captação, as coberturas verdes conseguem reter entre 65% e 84%, dependendo do tipo de sistema.

Com relação à capacidade de retenção por unidade de área, verificou-se que as coberturas modulares alcançaram o valor especificado pela empresa Ecotelhado, igual a 160 L/m<sup>2</sup> para modular alta e 60 L/m<sup>2</sup>

para modular baixa. Além disto, a capacidade de retenção média foi igual a 14,11 L/m<sup>2</sup> para modular alta, 10,51 L/m<sup>2</sup> para modular baixa e 7,74 L/m<sup>2</sup> para contínua.

Por meio de métodos estatísticos verificou-se que houve diferença significativa entre o comportamento da cobertura verde modular alta e da cobertura verde contínua. Isto é justificado pela elevada capacidade de armazenamento de água da cobertura modular alta, visto que sua camada de drenagem funciona como um reservatório. A cobertura contínua apresenta maior espessura da camada de substrato, porém, o mesmo atinge o ponto de saturação mais rapidamente, e nesta situação, sua capacidade de controle do escoamento pluvial é reduzida.

Contudo, os fatores que mostraram ter maior interferência no potencial de controle do escoamento pluvial das coberturas verdes correspondem à altura da precipitação pluviométrica, à condição de umidade antecedente do evento e à interrelação entre eles. De fato, os eventos em que as coberturas verdes apresentaram comportamento semelhante à cobertura convencional foram caracterizados pelo elevado volume precipitado e/ou elevada umidade antecedente. Observou-se uma relação crescente entre os valores do coeficiente de escoamento e a intensidade do evento, ou seja, nos eventos leves as coberturas verdes mostraram elevada capacidade de retenção do escoamento. Nos eventos fortes, com altura pluviométrica maior que 30mm, esta capacidade foi significativamente reduzida. Do mesmo modo, quando as coberturas verdes apresentaram níveis de saturação elevados, seu desempenho também foi inferior.

Com estes resultados, infere-se que as coberturas verdes possuem elevado potencial em reter parte, ou o total do volume precipitado nos eventos de chuva, conduzindo a um escoamento superficial significativamente inferior ao gerado em coberturas convencionais. A adoção de coberturas verdes em grande escala é uma alternativa para mitigar os problemas de drenagem urbana. Além disso, como grande parte do volume precipitado fica retido em seu sistema, as coberturas verdes podem contribuir para redução da poluição difusa, contribuindo para melhora da qualidade dos cursos d'água a que o escoamento pluvial é conduzido. Sendo assim, destaca-se a importância da adoção de técnicas alternativas de drenagem, pois isso pode contribuir para diminuição dos problemas oriundos da impermeabilização do solo. Este trabalho apresentou o comportamento de três tipos de coberturas verdes na cidade de Florianópolis. Com o monitoramento, pode-se concluir que o sistema que mostrou o melhor desempenho foi a cobertura verde modular alta, que apresentou o menor valor de coeficiente de escoamento, mostrando-

se como uma técnica eficiente para controle do escoamento pluvial na fonte.

Contudo, destaca-se que é importante analisar as condições climáticas do local de instalação, visto que a capacidade de retenção das coberturas verdes é fortemente influenciada pela condição de umidade antecedente e pelo volume precipitado. Ou seja, em cidades que apresentam índice pluviométrico elevado e precipitações muito frequentes o uso de coberturas verdes pode não ser a melhor alternativa para mitigação dos problemas de drenagem urbana.

## 5.2 ANÁLISE QUALITATIVA

A análise do controle qualitativo do escoamento pluvial foi realizada por meio da determinação da qualidade da água escoada pelas coberturas em estudo. Para verificar se elas atuaram como fonte de poluentes ou se ajudaram na retenção dos mesmos a qualidade da água da chuva coletada diretamente da atmosfera também foi avaliada.

Em geral, verificou-se que a passagem da água da chuva pelas coberturas verdes e pela cobertura convencional diminuiu sua qualidade. Após a aplicação de métodos estatísticos para comparação de resultados, verificou-se que a cobertura verde modular alta atuou como fonte de cor, ferro, nitrato, fósforo, fosfato e coliformes. A cobertura verde modular baixa apresentou comportamento semelhante, contudo, além destes parâmetros, ela também elevou os níveis de turbidez da água da chuva. O pior comportamento foi observado na cobertura verde contínua, que apresentou as maiores concentrações para os poluentes supracitados e, além disso, comportou-se como fonte de nitrito. Quanto à convencional, constatou-se que ela atuou como fonte de cor, ferro, nitrito, nitrato e coliformes. Percebeu-se que o substrato das coberturas verdes é responsável pela lixiviação de componentes de fósforo no escoamento, visto que apenas nestas coberturas observou-se a presença destes poluentes.

Com exceção da cobertura verde modular baixa, verificou-se que a passagem da água da chuva pelas demais coberturas aumentou significativamente o seu valor de pH. Isto confirma o potencial de neutralização da água das coberturas verdes e da cobertura de fibrocimento. Outro aspecto positivo observado refere-se à capacidade de retenção de amônia que todas as coberturas mostraram. Nas coberturas verdes este fato está associado à capacidade de absorção deste nutriente pelo substrato.

Nas coberturas verdes, principalmente na contínua, verificou-se a importância de se respeitar um período de estabilização das camadas de vegetação e de substrato. Os parâmetros referentes ao fósforo, ao nitrato, à cor aparente e à turbidez apresentaram concentrações muito elevadas nas primeiras coletas. Com o passar dos meses houve diminuição dos níveis obtidos inicialmente, sugerindo que a qualidade da água escoada tende a melhorar após um intervalo de tempo depois da instalação.

Outros fatores também mostraram interferência na concentração de alguns parâmetros no escoamento das coberturas verdes. Logo após a manutenção realizada, correspondente à retida de plantas invasoras, verificou-se um súbito aumento de nitrato e fósforo, sugerindo que a movimentação do substrato pode ter acarretado uma maior liberação destes nutrientes na água. Na cobertura verde contínua, as maiores temperaturas nos meses de dezembro e janeiro também ocasionaram aumento destes parâmetros, indicando a influência da sazonalidade na qualidade da água. Além disso, os valores de cor aparente e de turbidez aumentaram neste período para todas as coberturas verdes. Isso está associado à condição seca e à mortalidade de parte da vegetação, fator este que causou desestabilização da camada de substrato e, com isso, maior lixiviação de partículas para o escoamento destas coberturas.

O volume precipitado mostrou ser influente apenas para os parâmetros referentes à amônia e à turbidez, sugerindo que em eventos com maior altura pluviométrica a camada de substrato diminui sua capacidade de reter amônia e, ainda, provoca maior liberação de sólidos na água escoada.

Com relação aos diferentes tipos de coberturas verdes analisadas, os resultados indicaram que o escoamento da cobertura verde contínua foi o que apresentou a maior quantidade de poluentes. Os teores de turbidez, cor aparente, ferro, nitrito, fósforo, fosfato e coliformes termotolerantes foram significativamente maiores na água escoada por essa cobertura, indicando que a maior quantidade de substrato utilizado provocou maior liberação destes parâmetros no escoamento. Além disso, destaca-se que os maiores valores de turbidez e cor aparente estão relacionados com a posição do dreno no fundo da caixa de madeira e com o tipo de material utilizado na camada de filtro, que é distinto do utilizado nas coberturas verdes modulares. Isso evidencia a influência das características construtivas e da composição das coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento pluvial.

Comparando-se com a cobertura convencional, constatou-se que apenas as concentrações de nitrito foram significativamente menores no escoamento das coberturas verdes. Contudo, mesmo apresentando melhor

qualidade da água, a cobertura convencional também não atendeu aos limites impostos pela NBR 15.527, que preconiza requisitos a serem seguidos para aproveitamento da água da chuva para usos não potáveis, como limpeza de pisos, descargas de bacias sanitárias, irrigação, dentre outros. Deste modo, infere-se que mesmo sendo utilizada para esses fins, tanto a água escoada pelas coberturas verdes quanto a escoada pela cobertura convencional estão condicionadas a prévio tratamento antes de seguirem para a rede de abastecimento.

Uma sugestão que poderia ocasionar uma significativa melhora da qualidade da água escoada pela cobertura convencional corresponde ao descarte do escoamento inicial. Com isto, a maior parte dos poluentes e partículas depositadas na superfície da telha seriam eliminadas neste primeiro escoamento. Deste modo, a água que seria conduzida ao reservatório de armazenamento teria qualidade superior, podendo satisfazer alguns dos critérios definidos na NBR 15.527, como cor aparente e turbidez. Estes parâmetros estão fortemente ligados com a quantidade de sólidos suspensos e dissolvidos na água.

Deste modo, conclui-se que a dinâmica dos parâmetros presentes no escoamento das coberturas verdes foi influenciada por uma série de fatores, dentre os quais, destaca-se a altura do substrato utilizado, a presença de manutenção, a idade da cobertura verde, a sazonalidade e a condição da vegetação. Portanto, destaca-se a importância de se realizar a caracterização do escoamento gerado por este tipo de cobertura, visto que existem diferentes variáveis que interferem na quantidade de poluentes drenados por ela.

### 5.3 POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL

O potencial de economia de água potável que pode ser alcançado por um sistema de aproveitamento de água de chuva em edificações que possuam cobertura verde foi determinado por meio de simulação computacional com o programa Netuno. Após o monitoramento realizado, determinou-se o coeficiente de escoamento superficial de cada cobertura analisada, e sendo este um dado de entrada requerido pelo programa, foi possível realizar simulações considerando-se residências unifamiliares na cidade de Florianópolis.

Deste modo verificou-se se a instalação de um sistema de aproveitamento de água da chuva em edificações residenciais unifamiliares que possuam coberturas verdes conduz a uma economia considerável de água potável, visto que grande parte do volume

precipitado na superfície deste tipo de cobertura fica retido em suas camadas.

Como esperado, os resultados das simulações mostraram que edificações residenciais unifamiliares com coberturas verdes conduzem a um menor potencial de economia de água potável que edificações com cobertura convencional, principalmente para as modulares, que apresentaram os menores coeficientes de escoamento superficial. De fato, a elevada capacidade de retenção do escoamento pluvial das coberturas verdes faz com que a disponibilidade de água para o sistema de aproveitamento de água da chuva seja baixa, diminuindo sua eficiência.

Contudo, dependendo da demanda e disponibilidade de água da chuva, verificou-se que as coberturas verdes podem levar a uma economia de água potável considerável. A combinação de grandes áreas de captação com menor número de moradores na residência gerou resultados satisfatórios, sendo que para cobertura verde contínua os potenciais de economia foram muito semelhantes aos da cobertura de fibrocimento. Por outro lado, para áreas de captação pequenas e maiores demandas de água, a instalação de um sistema de aproveitamento em edificações com coberturas verdes não é viável, visto que o potencial de economia de água potável alcançado é muito baixo.

Deste modo, destaca-se a importância da análise da demanda e disponibilidade de água antes da instalação de um sistema de aproveitamento de água da chuva, principalmente quando a edificação possui coberturas verdes. Como o potencial de retenção do escoamento pluvial destas coberturas é elevado, a disponibilidade de água para o sistema de aproveitamento é menor, sendo fundamental realizar esta avaliação.

É importante salientar que a escassez de água já é um problema em muitas regiões do mundo, tendendo a se agravar nos próximos anos, devido ao aumento da população e ao elevado consumo de água. Sendo assim, destaca-se que o aproveitamento de água de chuva é uma alternativa que pode promover significativa economia dos recursos hídricos. Além disso, a análise da qualidade da água captada nas coberturas é fundamental, pois permite que a mesma seja destinada a usos que não comprometam a saúde e o bem-estar dos usuários. O presente estudo mostrou a dinâmica de alguns parâmetros de qualidade no escoamento de diferentes tipos de cobertura verde e de uma cobertura convencional. Com isso, foi possível verificar que diversos fatores afetam a qualidade da água escoada nas coberturas, sendo importante consultar as normativas disponíveis para realizar o controle da qualidade da água. Destaca-se ainda, a necessidade de incluir uma maior quantidade de

parâmetros para avaliação da qualidade da água para usos não potáveis na NBR 15.527, pois esta norma não verifica a presença de nutrientes, como as distintas formas de nitrogênio e fósforo, tampouco a presença de metais. Estes parâmetros mostraram-se presentes no escoamento das coberturas analisadas, principalmente na água escoada pelas coberturas verdes. Deste modo, a inserção destes poluentes na norma poderia contribuir para garantia da qualidade da água utilizada em usos não potáveis.

#### 5.4 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais limitações da presente pesquisa foram as seguintes:

- Não foi possível determinar o tempo de início e fim do escoamento, bem como sua duração. Isso impossibilitou a determinação do atraso do escoamento e da redução da vazão de pico das coberturas verdes;
- A determinação da quantidade de coliformes totais e termotolerantes foi realizada em apenas um evento de precipitação, não sendo possível analisar o comportamento destes parâmetros durante todo o período de monitoramento;
- Foram analisados apenas alguns dos parâmetros indicados na publicação da EMBRAPA, que determina a qualidade da água a ser utilizada para irrigação. Deste modo não foi possível verificar se a água escoada pelas coberturas analisadas atende aos limites impostos por essa documentação;
- O regime pluviométrico na cidade de Florianópolis durante os meses de julho a novembro mostrou-se atípico, tendo sido observados longos períodos sem nenhuma precipitação. Deste modo, a capacidade de retenção das coberturas verdes pode diminuir em um ano que as chuvas sejam mais frequentes;
- Um maior período de monitoramento poderia trazer resultados mais conclusivos a respeito da influência sazonal no comportamento das coberturas verdes no controle quantitativo e qualitativo do escoamento pluvial.

De modo a complementar os resultados obtidos na presente pesquisa bem como compreender a interação dos diversos fatores que interferem no controle quantitativo e qualitativo do escoamento pluvial gerado pelas coberturas verdes, sugere-se que sejam realizados os seguintes estudos:

- Realizar o monitoramento do escoamento das coberturas verdes a longo prazo, a fim de estabelecer a influência dos diversos fatores intrínsecos e extrínsecos à cobertura, tanto em âmbito quantitativo quanto qualitativo;
- Analisar coberturas verdes com diferentes composições de substrato e vegetação no clima de Florianópolis, a fim de verificar se estes fatores levariam a um comportamento distinto do observado neste estudo;
- Utilizar fertilizantes nas coberturas verdes a fim de verificar a influência deste tipo de manutenção na aparência estética da cobertura verde bem como na qualidade de seu escoamento;
- Realizar estudos que analisem o impacto das coberturas verdes no dimensionamento das redes de drenagem em Florianópolis, caso se considere que as coberturas convencionais sejam substituídas por este tipo de cobertura.



## REFERÊNCIAS

ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. **Revista de Saúde Pública**, v. 32, n.2, p. 161-165, 1998.

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, n.4, p. 480-493, 2008.

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, 2010.

ANA; FIESP; SindusCon-SP. **Conservação e Reúso de Águas em Edificações**. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 13.969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997, 60 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.527**: Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 8 p.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BEECHAM, S.; RAZZAGHMANESH, M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. **Water Research**, v. 70, n. 1, p. 370-384, 2015.

BERNDTSSON, J. C.; EMILSSON, T.; BENGTSSON, L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. **The Science of the total environment**, v. 355, n. 1-3, p. 48-63, 2006.

BERNDTSSON, J. C. Seasonal changes of runoff water quality from an extensive vegetated roof. In: International Conference on Urban Drainage, 11., 2008, Edinburgh. **Proceedings...** Edinburgh, 2008.

BERNDTSSON, J. C.; BENGTSSON, L.; JINNO, K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 3, p. 369-380, 2009.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 351-360, 2010.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, v. 48, p. 57-65, 2012.

BLISS, D.; NEUFELD, R.; RIES, R. Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. **Environmental Engineering Science**, v. 26, n. 2, p. 407-418, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução 357, de 17 de março de 2005**. Brasília: 27 p. 2005.

BRASIL. **Programa – 2040 - Gestão de Riscos e Resposta a Desastres**. Ministério das Cidades. Manual para Apresentação de Propostas para Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável e de Manejo de Águas Pluviais. 26 p. 2012.

BUDEL, M. A. **Estudo comparativo da qualidade da água de chuva coletada em cobertura convencional e em telhado verde**. 2014. 125 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E.; DURTSCHKE, R. D. Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 506-514, 2016.

CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. Hydrologic behavior of vegetated roofs. **Jawra - Journal of The American Water Resources Association**, v. 42, n. 5. p.1261-1274, 2006.

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S.B.M.; DAVISON, J.B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1582-1591, 2010.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Revista Atitude - Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre**, v. 4, n. 7, p. 75-81, 2010.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 142 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas de amostragem**. Apêndice A. São Paulo: CETESB, 2009.

CHENANI, S. B.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 153-162, 2015.

CURITIBA. **Lei Nº 10.785, de 18 de setembro de 2003**. Cria no Município de Curitiba o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações – PURAE. Curitiba, 3p., 2003.

CURITIBA. **Decreto Nº 212, de 29 de março de 2007**. Aprova o Regulamento de Edificações do Município de Curitiba e dá outras providências. Curitiba, 2007.

Department of Environmental Resource. **Low-Impact Development Design Strategies - An Integrated Design Approach**. Maryland, 1999.

ECOTELHADO. “Ecotelhado”, 2016. Disponível em: [www.ecotelhado.com.br](http://www.ecotelhado.com.br). Acesso em: janeiro de 2016.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de posse e de equipamentos e hábitos de uso – classe residencial**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2007, 159p.

FARIAS, M. M. M. W. E. C. Aproveitamento de águas de chuva por telhados: aspectos quantitativos e qualitativos. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.

FIORUCCI, A. R.; BENEDETTI, E. F. A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. **Química e Sociedade**, n.22, p.10-16, 2005.

GARCEZ, L. N. **Manual de procedimentos e técnicas laboratoriais voltado para análise da água e esgotos sanitários e industriais**. São Paulo, SP: EPUSP, 2004.

GETTER, K. L.; ROWE, B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **HortScience**, v. 41, p. 1276-1286, 2006.

GETTER, K. L.; ROWE, B.; ANDRESEN, J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. **Ecological Engineering**, v. 31, p. 225-231, 2007.

GHISI, E.; MONTIBELLER, A.; SCHMIDT, R. W. Potential for potable water savings by using rainwater: An analysis over 62 cities in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 40, n. 204-210, 2006.

GHISI, E.; FERREIRA, D. F. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, p. 2512-2522, 2007.

GHISI, E.; OLIVEIRA, S. M. Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 42, p. 1731-1742, 2007.

GHISI, E.; SCHONDERMARK, P. N. Investment Feasibility Analysis of Rainwater Use in Residences. **Water Resources Management**, v.27, n.7, p. 2555-2576, 2013.

GHISI, E.; CORDOVA, M. M. **Netuno 4. Programa computacional**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, 2014. Disponível em: [www.labee.ufsc.br](http://www.labee.ufsc.br). Acesso em: abril de 2016.

GNECCO, I.; PALLA, A.; LANZA, L. G.; BARBELA, P. L. The role of green roofs as a source/sink of pollutants in stormwater outflows. **Water Resources Management**, v. 27, n. 14, p. 4715-4730, 2013.

GOIÂNIA. **Lei Nº 9.511, de 15 de dezembro de 2014**. Estabelece regras de Controle de Águas Pluviais e Drenagem Urbana e dá outras providências. Goiânia, 2014.

GRACESON, A.; MONAGHAN, J.; HALL, N.; HARE, M. Plant growth responses to different growing media for green roofs. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 196-200, 2014.

GREGOIRE, B.; CLAUSEN, J. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 6, p. 963-969, 2011.

HARPER, G. E.; LIMMER, M. L.; SHOWALTER, W. E.; BURKEN, J. G. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. **Ecological Engineering**, v. 78, p. 127-133, 2015.

HATHAWAY, A. M.; HUNT, W. F.; JENNINGS, G. D. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. **American Society of Agriculture and Bioengineers**, v. 51, p. 37-44, 2008.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde**. 2008. 49 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

HUI, S. C. M. Benefits and potential applications of green roof systems in Hong Kong. In: 2nd Megacities International Conference, 2, 2006, Guangzhou, China. **Anais...** 2006. p. 351-360.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 10 de janeiro de 2016.  
 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) **Dados de precipitação para cidade de Florianópolis**. Disponível em: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). Acesso em: março de 2015.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157-164, 2012.

JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. 2013. 75 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F. W.; LAAR, M.; PAIVA, V. L. A.; TAVARES, S. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**, v. 13, n. 4, p. 382-391, 2002.

LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTTI, F.; BUSATO, F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 1260-1267, 2005.

LEE, J. Y.; MOON, H. J.; KIM, T. I.; KIM, H. W.; HAN, M. Y. Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system. **Environmental Pollution**, v. 181, p. 257-261, 2013.

LEE, J. Y.; LEE, M. J.; HAN, M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. **Journal of Environmental Management**, v. 152, p. 171-176, 2015.

LORENZINI, F. N. **Modelagem de telhado verde: uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MARTIN, B. K. **The dynamic stormwater response of a green roof**. 2008. 149 f. Tese (Mestrado em Arquitetura Paisagista) - Universidade de Guelph, Canadá.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Greenroofs As A Part Of Urban Water Management. **Water Resource Management II**, v. 61, p. 35-44, 2003.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. **Landscape and Urban Planning**, v. 77, p. 217-226, 2006.

MINKE, G. (2003). **Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos**. Montevideo: Fin de Siglo.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings**, v. 33, p. 719 – 729, 2001.

OBERNDORFER, E.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R. R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KÖHLER, M.; LIU, K. K. Y.; ROWE, B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience**, v. 57, p. 823-833, 2007.

PARIZOTTO, S. Telhado vegetado. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010.

PERSCH, C. G.; TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; WOLFF, D. Avaliação do comportamento de um telhado verde sob condições climáticas subtropicais. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Maceió, 2011.

PESSOA, J. O. **Qualidade e quantidade de águas pluviais escoadas a partir de telhados verdes extensivos em Santa Maria-RS**. 2016. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PINTO, E. M. A gestão de recursos hídricos e as interferências do sistema urbano: município de queimados - RJ. **Revista Universidade Rural, Série Ciências Humanas e Sociais**, v. 29, n.1, p. 125-131, 2007.

ROSSATO, H.; MOYANO, G.; CAZORLA, L.; LAUREDA, D.; MEYER, M.; GAMBOA, P.; BARGIELA, M.; CASO, C.; VILLALBA, G.; BARRERA, D.; PRUZZO, L.; RODRÍGUEZ, P. L.; OLIVERI, A.; WASLAVSKY, A.; HASHIMOTO, P.; KOHAN, D. Cubiertas vegetadas de tipo "extensivo", eficiencia en la retención del agua de lluvia de distinto tipo de vegetación implantada. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**, v. 47, n.2, p. 123-134, 2015.

SANTOS, P. T. S.; SANTOS, S. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S.; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 161-174, 2013.

SÃO PAULO. **Lei Nº 12.526, de 02 de janeiro de 2007**. Estabelece normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais. São Paulo, 2007.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 139-154, 2014.

TEEMUSK, A.; MANDER, Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. **Ecological Engineering**, v. 30, n. 3, p. 271-277, 2007.

TEIXEIRA, P. C. **Qualidade da água drenada por coberturas verdes para fins de aproveitamento em edifícios**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Campinas, Campinas.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Revista de Gestão da Água da América Latina - REGA**, v. 1, n. 1. p. 59-73, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2005.



USEPA. **Urban Stormwater BMP Performance Monitoring.**

Washington, DC: American Society of Civil Engineers, Washington, DC., 2002.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M.; BALASUBRAMANIAN, R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. **Water Research**, v. 46, n. 4, p. 1337-1345, 2012.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.57, p. 740-752, 2016.

VILLARREAL, E. L.; BENGTSSON, L. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 1, p. 1-7, 2005.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Minas Gerais: UFMG, 1995.

WILLIS, R.M.; STEWART, R.A.; PANUWATWANICH, K.; CAPATI, B.; GIURCO, D. Gold Coast Domestic Water End Use Study. **Water**, v. 36, p. 79-85, 2009.

WONG, G.K.L.; JIM, C.Y. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. **Ecological Engineering Journal**, v. 70, p. 366-378, 2014.

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 31, p. 7266-7273, 2008.

ZHANG, Q.; MIAO, L.; WANG, X.; LIU, D.; ZHU, L.; ZHOU, B.; SUN, J.; LIU, J. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. **Landscape and Urban Planning**, v. 144, p. 142-150, 2015.



## **APÊNDICES**



## APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA ANALISADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos para análise da água, sendo que o sistema 1 corresponde à cobertura verde modular alta, o sistema 2, à cobertura verde modular baixa, o sistema 3, à cobertura verde contínua e o sistema 4, à cobertura com telhas de fibrocimento.

**Tabela A.1 – Estatística descritiva dos resultados obtidos para cada parâmetro em cada sistema analisado.**

Parâmetro	Tratamento	n	Mín.	Máx.	Méd.	Mediana	Desvio padrão
<b>pH</b>	Modular alta	8	6,55	7,90	6,89	6,76	0,43
	Modular baixa	10	5,15	6,91	6,26	6,31	0,47
	Contínua	19	5,55	7,58	6,70	6,71	0,46
	Convencional	31	7,44	9,14	8,12	8,12	0,39
	Água da chuva	31	5,04	6,92	6,15	6,18	0,47
<b>Cor aparente (uC)</b>	Modular alta	8	204	285	235	232	24
	Modular baixa	10	188	332	255	253	51
	Contínua	19	223	841	500	458	174
	Convencional	31	1	29	11	9	8
	Água da chuva	31	0	10	4	4	2
<b>Turbidez (NTU)</b>	Modular alta	8	1,077	5,023	1,974	1,533	1,261
	Modular baixa	10	0,871	6,200	2,728	2,532	1,626
	Contínua	19	1,340	21,367	7,053	3,590	6,816
	Convencional	31	0,272	8,267	1,705	1,450	1,547
	Água da chuva	31	0,231	4,740	1,263	0,988	1,058
<b>Ferro (mg/L)</b>	Modular alta	8	1,20	2,39	1,78	1,69	0,45
	Modular baixa	10	1,41	2,42	1,91	2,02	0,33
	Contínua	19	1,11	5,72	3,08	2,65	1,37
	Convencional	31	0,00	1,30	0,27	0,16	0,33
	Água da chuva	31	0,00	0,35	0,05	0,01	0,08
<b>Amônia (mg/L)</b>	Modular alta	8	0,05	0,20	0,11	0,10	0,05
	Modular baixa	10	0,05	0,40	0,14	0,13	0,10
	Contínua	19	0,05	0,25	0,12	0,10	0,07
	Convencional	31	0,05	0,50	0,15	0,15	0,09
	Água da chuva	31	0,10	2,00	0,38	0,25	0,39

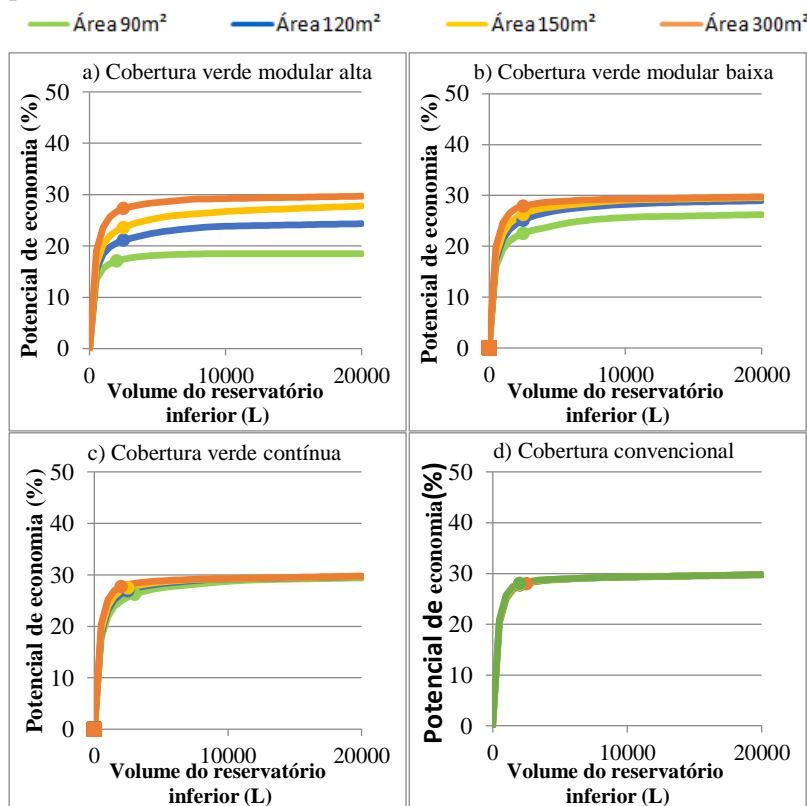
**Tabela A.1 – Estatística descritiva dos resultados obtidos para cada parâmetro em cada sistema analisado (cont.).**

<b>Parâmetro</b>	<b>Tratamento</b>	<b>n</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Méd.</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Nitrito (mg/L)</b>	Modular alta	8	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01
	Modular baixa	10	0,01	0,05	0,03	0,03	0,01
	Contínua	19	0,01	0,54	0,08	0,05	0,12
	Convencional	31	0,00	1,31	0,11	0,05	0,23
	Água da chuva	31	0,00	0,50	0,03	0,01	0,09
<b>Nitato (mg/L)</b>	Modular alta	8	0,96	5,02	3,04	2,74	1,53
	Modular baixa	8	1,05	4,12	2,72	2,82	1,04
	Contínua	15	0,03	8,50	5,06	5,67	2,66
	Convencional	24	0,00	3,51	1,48	1,28	0,95
	Água da chuva	24	0,00	3,06	0,75	0,59	0,90
<b>Fosfóro (mg/L)</b>	Modular alta	8	1,44	3,77	2,31	2,10	0,75
	Modular baixa	10	1,32	3,31	2,29	2,32	0,67
	Contínua	19	2,03	24,60	7,71	6,08	5,77
	Convencional	31	0,00	2,09	0,32	0,15	0,45
	Água da chuva	31	0,00	1,70	0,21	0,05	0,41
<b>Fosfato (mg/L)</b>	Modular alta	8	0,00	0,29	0,12	0,10	0,09
	Modular baixa	8	0,18	0,90	0,39	0,29	0,24
	Contínua	15	0,46	7,28	2,73	2,11	1,86
	Convencional	24	0,00	0,36	0,11	0,02	0,13
	Água da chuva	24	0,00	0,16	0,02	0,01	0,04
<b>Oxigênio dissolvido (mg/L)</b>	Modular alta	8	6,76	9,87	8,32	7,86	1,30
	Modular baixa	10	5,28	10,13	7,62	7,16	1,79
	Contínua	19	6,12	10,44	8,24	8,01	1,12
	Convencional	31	7,03	10,40	8,40	8,21	0,75
	Água da chuva	31	7,20	11,44	8,51	8,33	0,86

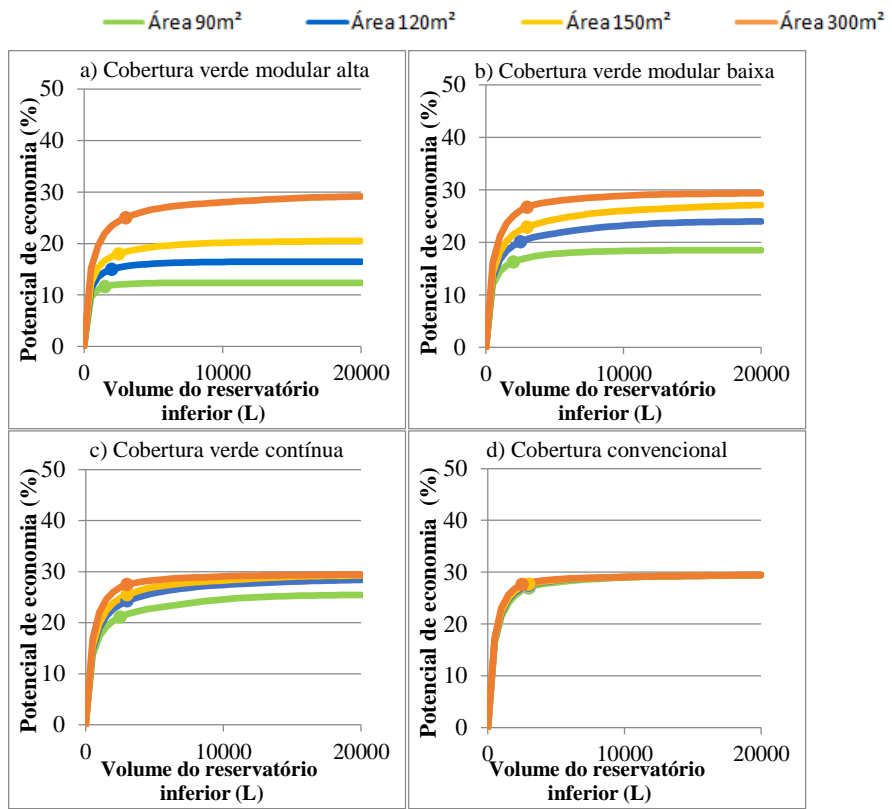
## APÊNDICE B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NO PROGRAMA NETUNO

A seguir são apresentados os gráficos obtidos com o programa Netuno para as diferentes condições simuladas. Os parâmetros variáveis corresponderam à área de captação (90m<sup>2</sup>, 120m<sup>2</sup>, 150m<sup>2</sup> e 300m<sup>2</sup>), ao número de habitantes (2, 3 e 4 moradores) e ao percentual de substituição de água potável por água da chuva (30%, 40% e 50%). O consumo de água por habitante utilizado foi igual 175 l/hab./dia.

**Figura B.1. - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 30% e o número de moradores igual a 2.**

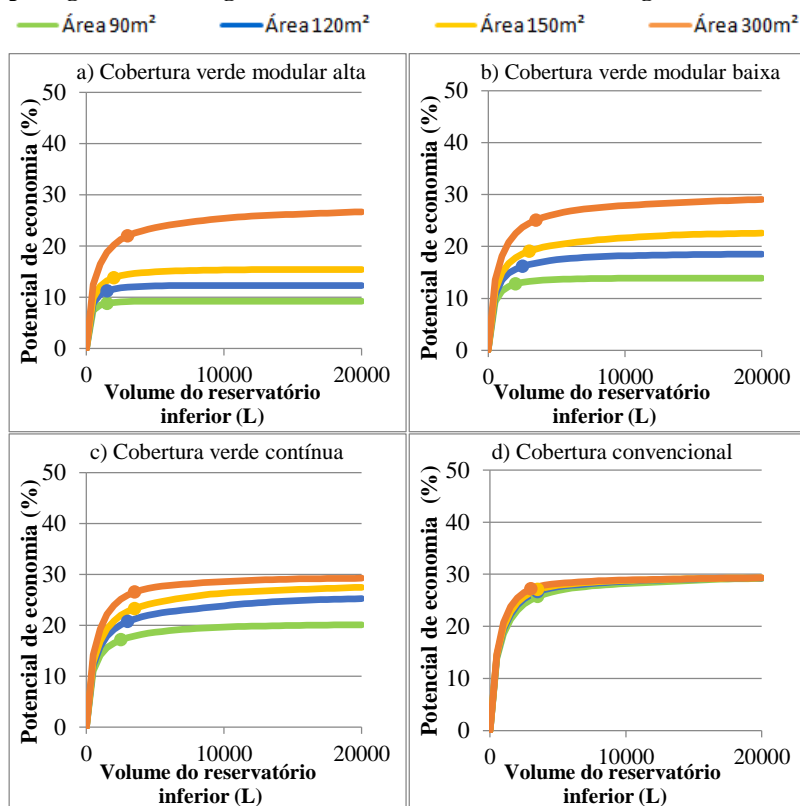


**Figura B.2 - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 30% e o número de moradores igual a 3.**

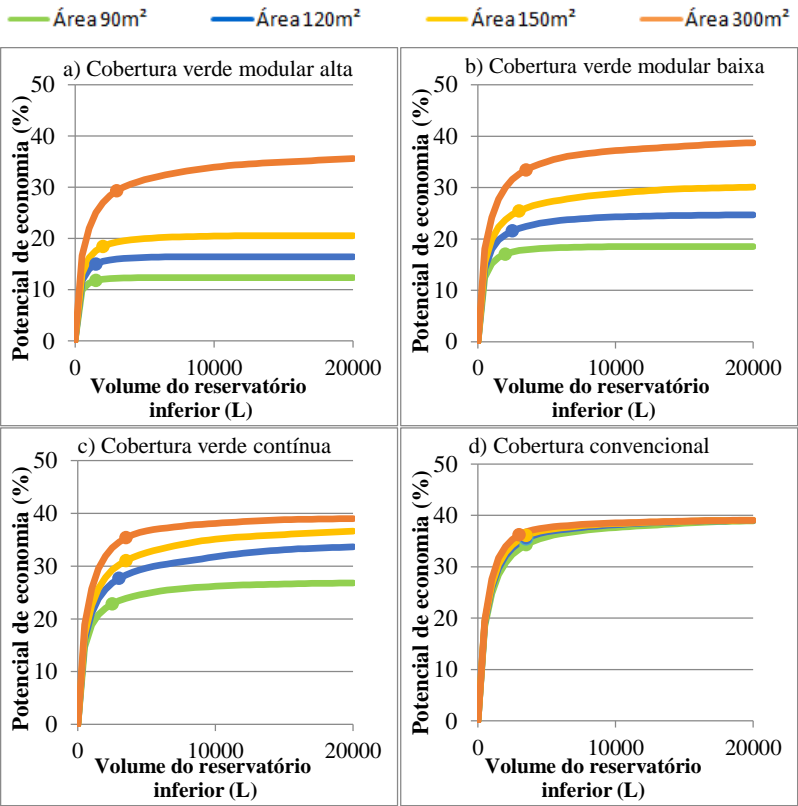




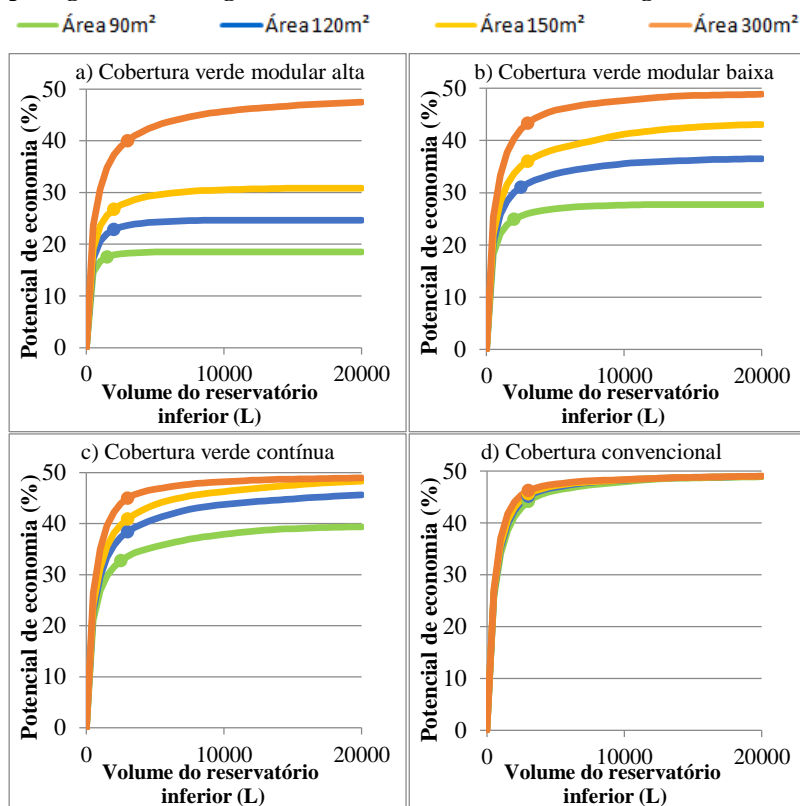
**Figura B.3 - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 30% e o número de moradores igual a 4.**



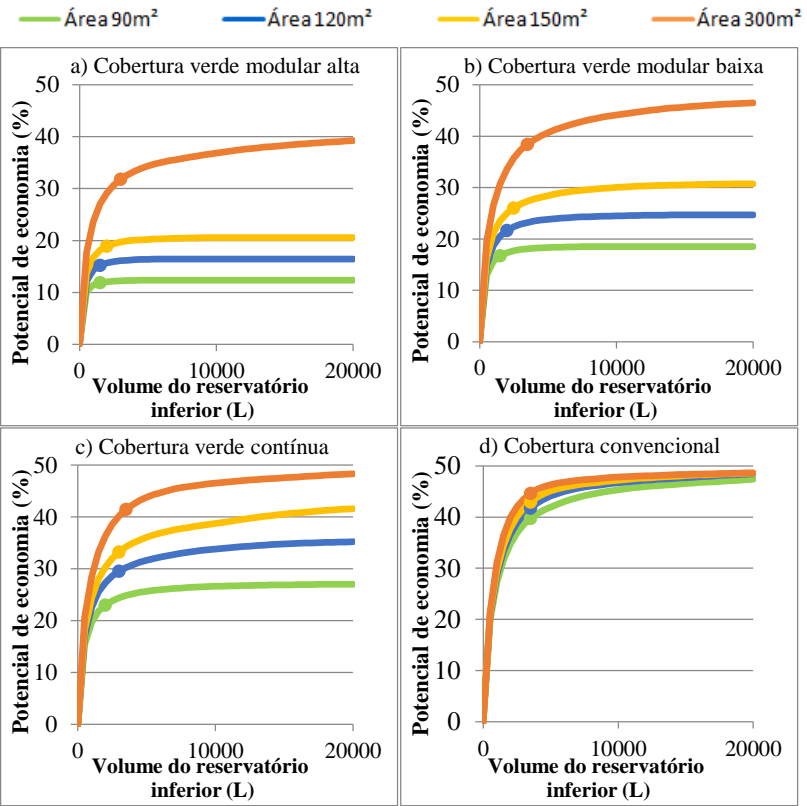
**Figura B.4 - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 40% e o número de moradores igual a 3.**



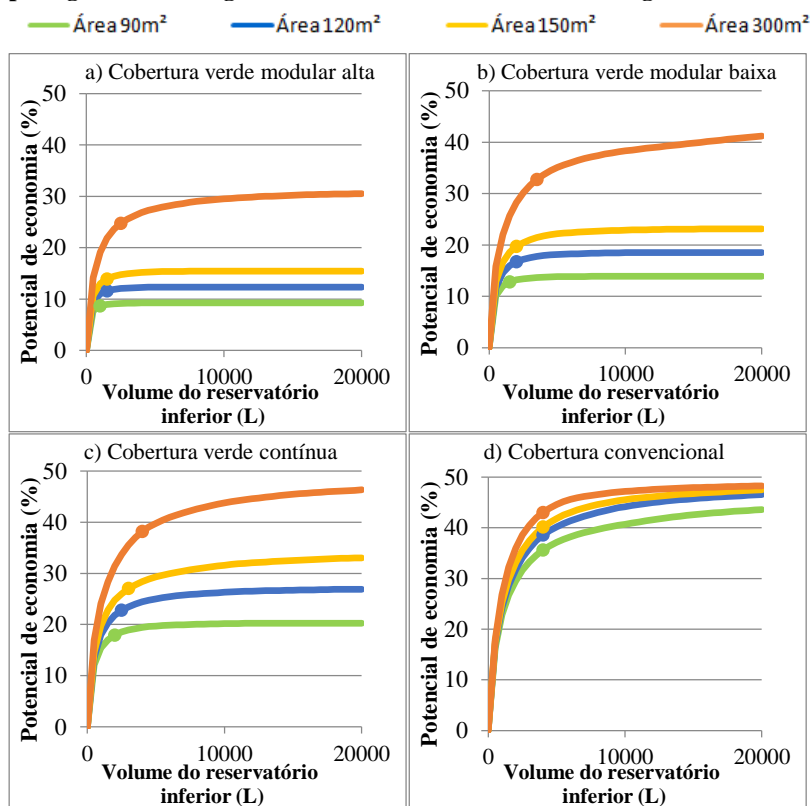
**Figura B.5 - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 50% e o número de moradores igual a 2.**



**Figura B.6 - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 50% e o número de moradores igual a 3.**



**Figura B.7 - Resultados da simulação para os diferentes tipos de cobertura analisados considerando-se o percentual de substituição de água potável por água da chuva igual a 50% e o número de moradores igual a 4.**





## APÊNDICE C – VOLUME DO RESERVATÓRIO IDEAL E O CORRESPONDENTE POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL PARA CADA COBERTURA ANALISADA.

A seguir são apresentados os resultados das simulações realizadas no Netuno. As tabelas indicam o volume do reservatório ideal e o potencial de economia de água potável obtido nos diferentes cenários simulados para cada tipo de cobertura analisada.

**Tabela C.1 – Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura verde modular alta.**

<b>Cobertura verde modular alta</b>				
Área de captação (m²)	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
90	2	30	2000	17,06
90	2	40	1500	17,27
90	2	50	1500	17,54
90	3	30	1500	11,63
90	3	40	1500	11,79
90	3	50	1500	11,88
90	4	30	1500	8,85
90	4	40	1000	8,62
90	4	50	1000	8,68
120	2	30	2500	21,13
120	2	40	2000	22,08
120	2	50	2000	22,85
120	3	30	2000	15,01
120	3	40	1500	15,01
120	3	50	1500	15,25
120	4	30	1500	11,26
120	4	40	1500	11,48
120	4	50	1500	11,60

**Tabela C.1 – Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura verde modular alta (cont.).**

<b>Cobertura verde modular alta</b>				
Área de captação (m²)	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
150	2	30	2500	23,60
150	2	40	2500	26,24
150	2	50	2000	26,80
150	3	30	2500	18,00
150	3	40	2000	18,42
150	3	50	2000	18,91
150	4	30	2000	13,81
150	4	40	2000	14,26
150	4	50	1500	13,92
300	2	30	2500	27,32
300	2	40	3000	34,61
300	2	50	3000	40,04
300	3	30	3000	25,01
300	3	40	3000	29,35
300	3	50	3000	31,82
300	4	30	3000	22,01
300	4	40	3000	24,30
300	4	50	2500	24,75



**Tabela C.2 - Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura verde modular baixa.**

<b>Cobertura verde modular baixa</b>				
Área de captação (m <sup>2</sup> )	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
90	2	30	2500	22,56
90	2	40	2000	23,87
90	2	50	2000	24,94
90	3	30	2000	16,32
90	3	40	2000	17,05
90	3	50	1500	16,75
90	4	30	2000	12,79
90	4	40	1500	12,62
90	4	50	1500	12,81
120	2	30	2500	25,14
120	2	40	2500	28,99
120	2	50	2500	31,04
120	3	30	2500	20,13
120	3	40	2500	21,57
120	3	50	2000	21,64
120	4	30	2500	16,18
120	4	40	2000	16,38
120	4	50	2000	16,75
150	2	30	2500	26,28
150	2	40	3000	32,44
150	2	50	3000	36,02
150	3	30	3000	22,95
150	3	40	3000	25,46
150	3	50	2500	26,02
150	4	30	3000	19,09
150	4	40	2500	19,75
150	4	50	2000	19,71

**Tabela C.2 - Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura verde modular baixa (cont.).**

<b>Cobertura verde modular baixa</b>				
Área de captação (m <sup>2</sup> )	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
300	2	30	2500	27,92
300	2	40	3000	36,43
300	2	50	3000	43,34
300	3	30	3000	26,73
300	3	40	3500	33,47
300	3	50	3500	38,44
300	4	30	3500	25,10
300	4	40	3500	29,81
300	4	50	3500	32,76

**Tabela C.3 - Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura verde modular baixa.**

<b>Cobertura verde contínua</b>				
Área de captação (m <sup>2</sup> )	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
90	2	30	3000	26,26
90	2	40	2500	30,15
90	2	50	2500	32,73
90	3	30	2500	21,09
90	3	40	2500	22,86
90	3	50	2000	22,99
90	4	30	2500	17,14
90	4	40	2000	17,43
90	4	50	2000	17,92
120	2	30	2500	26,91
120	2	40	3000	33,77

**Tabela C.3 - Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura verde modular baixa (cont.).**

<b>Cobertura verde contínua</b>				
Área de captação (m <sup>2</sup> )	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
120	2	50	3000	38,4
120	3	30	3000	24,24
120	3	40	3000	27,68
120	3	50	3000	29,53
120	4	30	3000	20,76
120	4	40	2500	21,78
120	4	50	2500	22,76
150	2	30	2500	27,5
150	2	40	3000	35,13
150	2	50	3000	40,93
150	3	30	3000	25,45
150	3	40	3500	31,04
150	3	50	3000	33,23
150	4	30	3500	23,28
150	4	40	3000	25,46
150	4	50	3000	27,02
300	2	30	2000	27,75
300	2	40	2500	36,55
300	2	50	3000	44,99
300	3	30	3000	27,44
300	3	40	3500	35,37
300	3	50	3500	41,43
300	4	30	3500	26,53
300	4	40	4000	33,19
300	4	50	4000	38,15

**Tabela C.4 - Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura convencional.**

<b>Cobertura convencional</b>				
Área de captação (m²)	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
90	2	30	2500	28,01
90	2	40	3000	36,75
90	2	50	3000	44,13
90	3	30	3000	27,06
90	3	40	3500	34,29
90	3	50	3500	39,72
90	4	30	3500	25,72
90	4	40	3500	30,98
90	4	50	4000	35,60
120	2	30	2000	27,78
120	2	40	2500	36,61
120	2	50	3000	45,12
120	3	30	3000	27,50
120	3	40	3500	35,53
120	3	50	3500	41,73
120	4	30	3500	26,65
120	4	40	4000	33,47
120	4	50	4000	38,56
150	2	30	2000	27,88
150	2	40	2500	36,81
150	2	50	3000	45,60
150	3	30	3000	27,66
150	3	40	3500	36,07
150	3	50	3500	42,92
150	4	30	3500	27,05
150	4	40	3500	33,69
150	4	50	4000	40,11

**Tabela C.4 - Volume do reservatório ideal e o correspondente potencial de economia de água potável para cobertura convencional.**

<b>Cobertura convencional</b>				
Área de captação (m²)	Nº de moradores	Percentual de substituição (%)	Volume do reservatório ideal (L)	Potencial de economia de água potável (%)
300	2	30	2000	28,05
300	2	40	2500	37,14
300	2	50	3000	46,21
300	3	30	2500	27,58
300	3	40	3000	36,21
300	3	50	3500	44,61
300	4	30	3000	27,16
300	4	40	3500	35,25
300	4	50	4000	42,98